HDR 理論と実践

内村 創 / Polyphony Digital Inc.

AGENDA

- SDR/HDRテレビシステムの概要
- GTSPORT SDR制作時代
- GTSPORT HDR制作時代
- そこで遭遇したトラブルとその解決
- アセットの広色域化、HDR化
- 将来展望

よくある質問：HDRやる価値ある？

- あると思います。

- SDRのテレビは間違いなく、今後絶滅します
- スマホもHDRに移行しつつある
- 正しく絵を出した時、圧倒的な魅力がある
  - = 正しく出さないと、魅力が伝わりにくい

HDRの効果のイメージ

HDRやっていきましょう

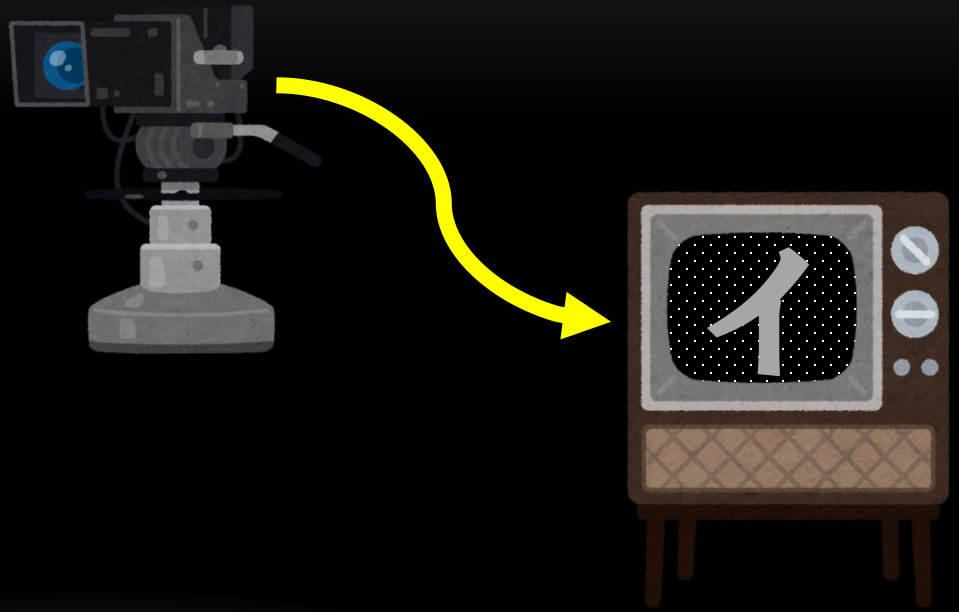
EOTF, Gamut, ...

HDRテレビって何？
テレビのメカニズム.

テレビのしくみ

- 信号を受信する
- 信号に応じた光を出す

- 昔はフィルムと透過光
- 今は液晶画面と透過光
- これからは有機EL？



SDR>HDR

- よりコントラストの強い映像を表示できるテレビが出てきた
- そのテレビの性能を活かせるような信号規格が提案された
- HDR10, Hybrid Log-Gamma(HLG), Dolby Vision, etc..

- “HDR” : High Dynamic Range
- “SDR” : Standard Dynamic Range

nit

- nit(ニト)は輝度の単位です
- 1 nit = 1cd/m^2

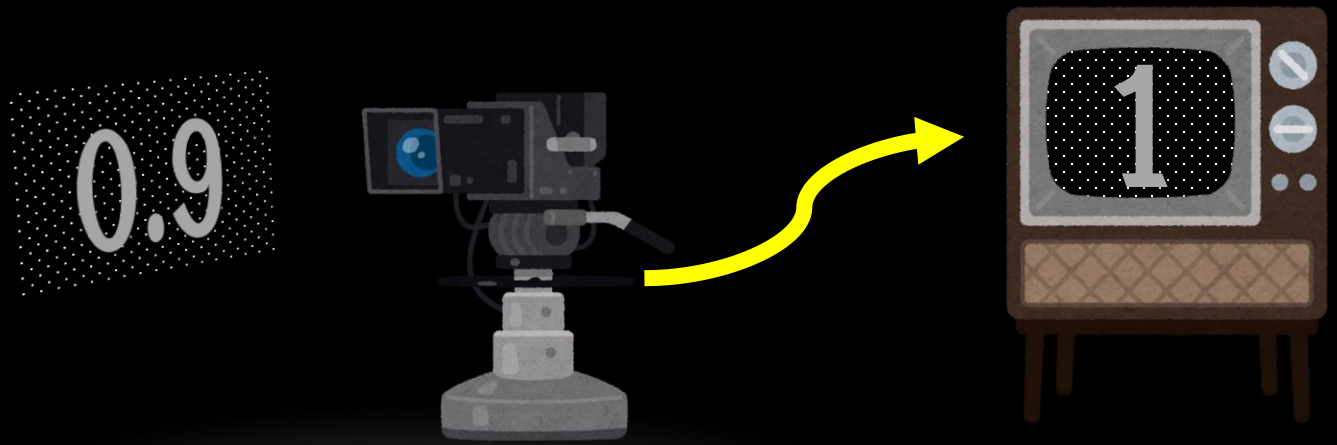
- SDRテレビの白(= 信号1.0)は規格では 100 nit とされている
- HDRテレビの白(= 信号1.0)は規格では 1,000〜10,000 nit
- つまり、規格上は 100倍明るい色が出せる

ダイナミックレンジ

- 黒と白の比
- 黒の明るさを B nit
- 白の明るさを W nit
- ダイナミックレンジは log(W/B)
- これが12を越えたくらいから人間の目が満足する…らしい

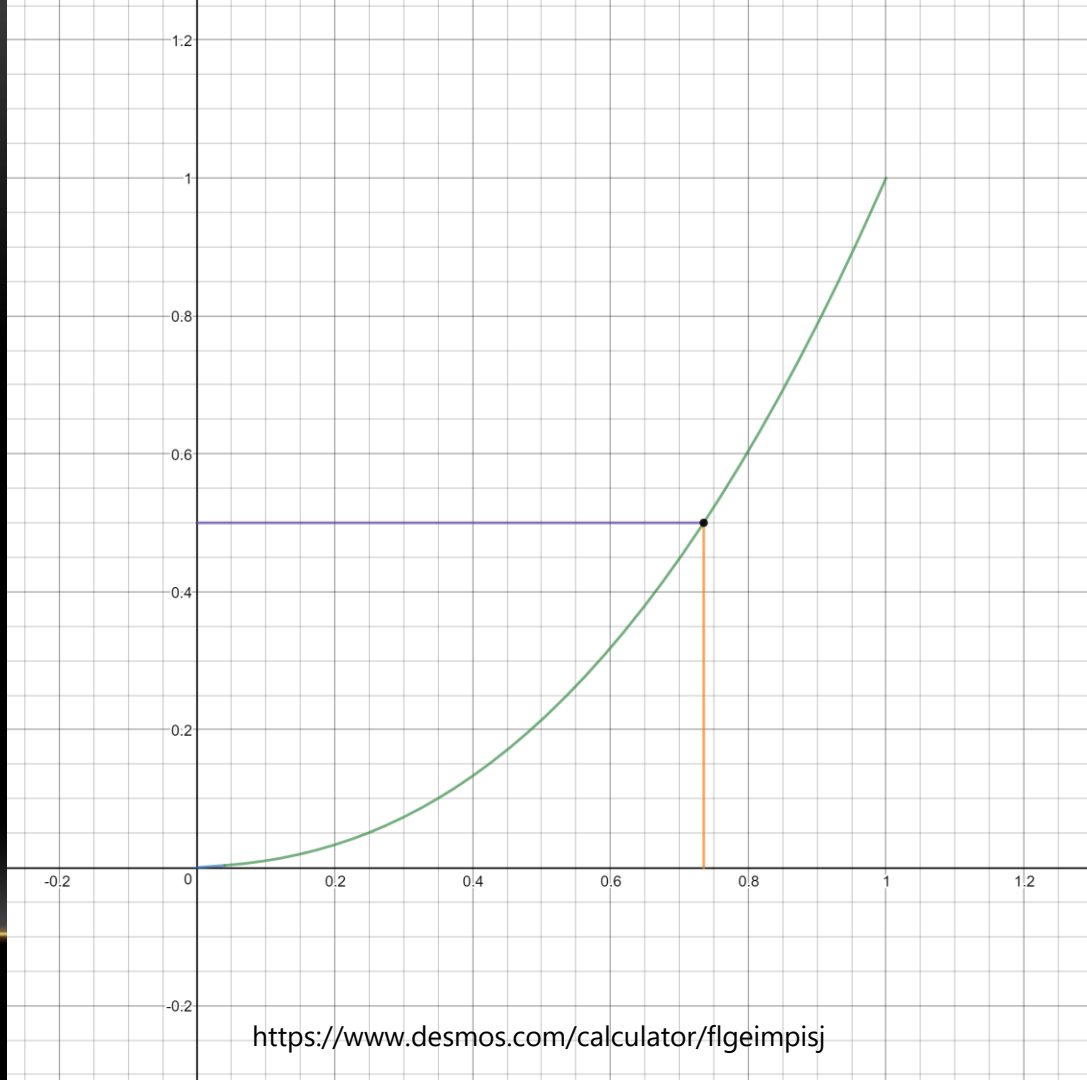
テレビのしくみ

- ブラウン管の特性上、
  信号と光の対応は
  直線ではない



ガンマ

- 電圧と光度が非線形
- バリエーションがある
  - sRGB
  - BT.709
  - BT.1886

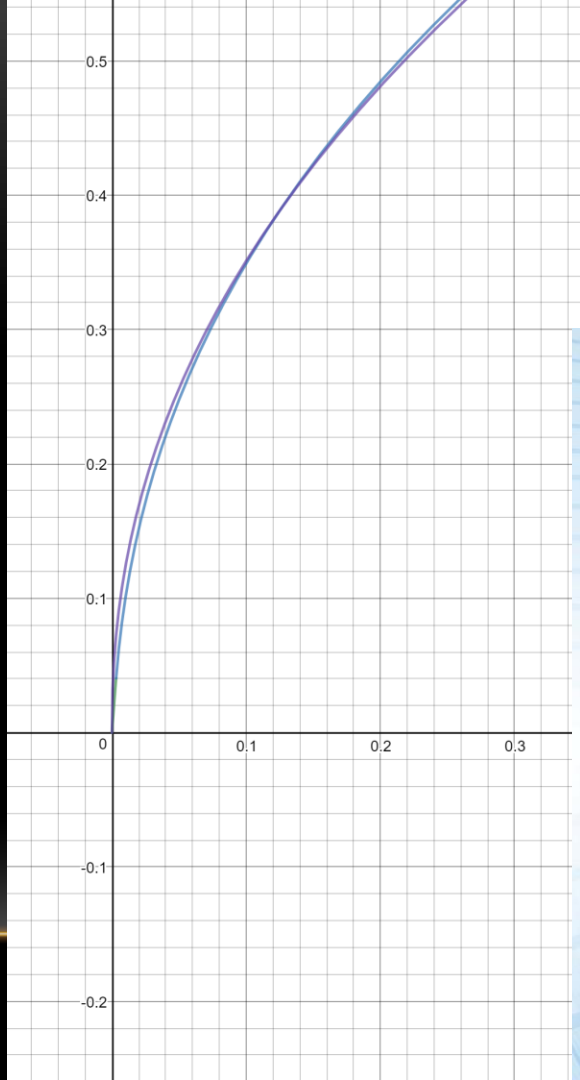


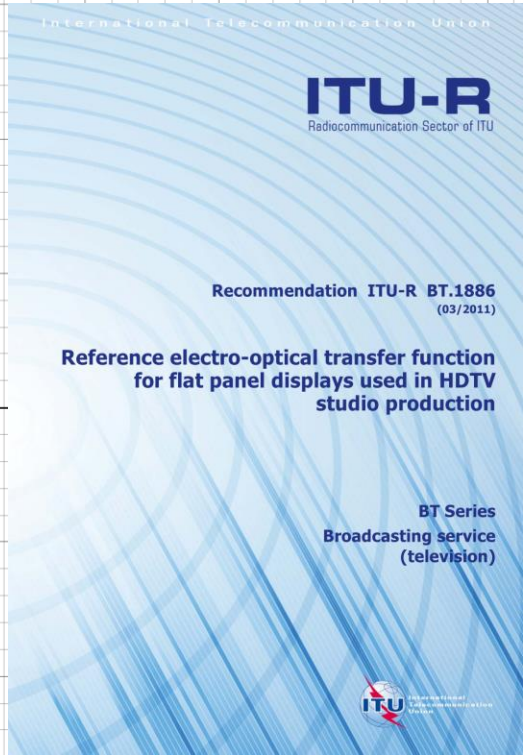
https://www.desmos.com/calculator/flgeimpisj

sRGB

- powで近似することも
- 実際には結構違います

- BT.709 , BT.1886 とか
  全部係数が違います
- テレビ機種によっても違う
- 詳細はITU勧告を参照





HDRのガンマ

- 大きく二つのガンマカーブがあります
  - HDR10(PQ)
  - HLG

HDRのガンマ

- 大きく二つのガンマカーブがあります
  - HDR10(PQ)
  - HLG

“EOTF” / “OETF” と呼びます。

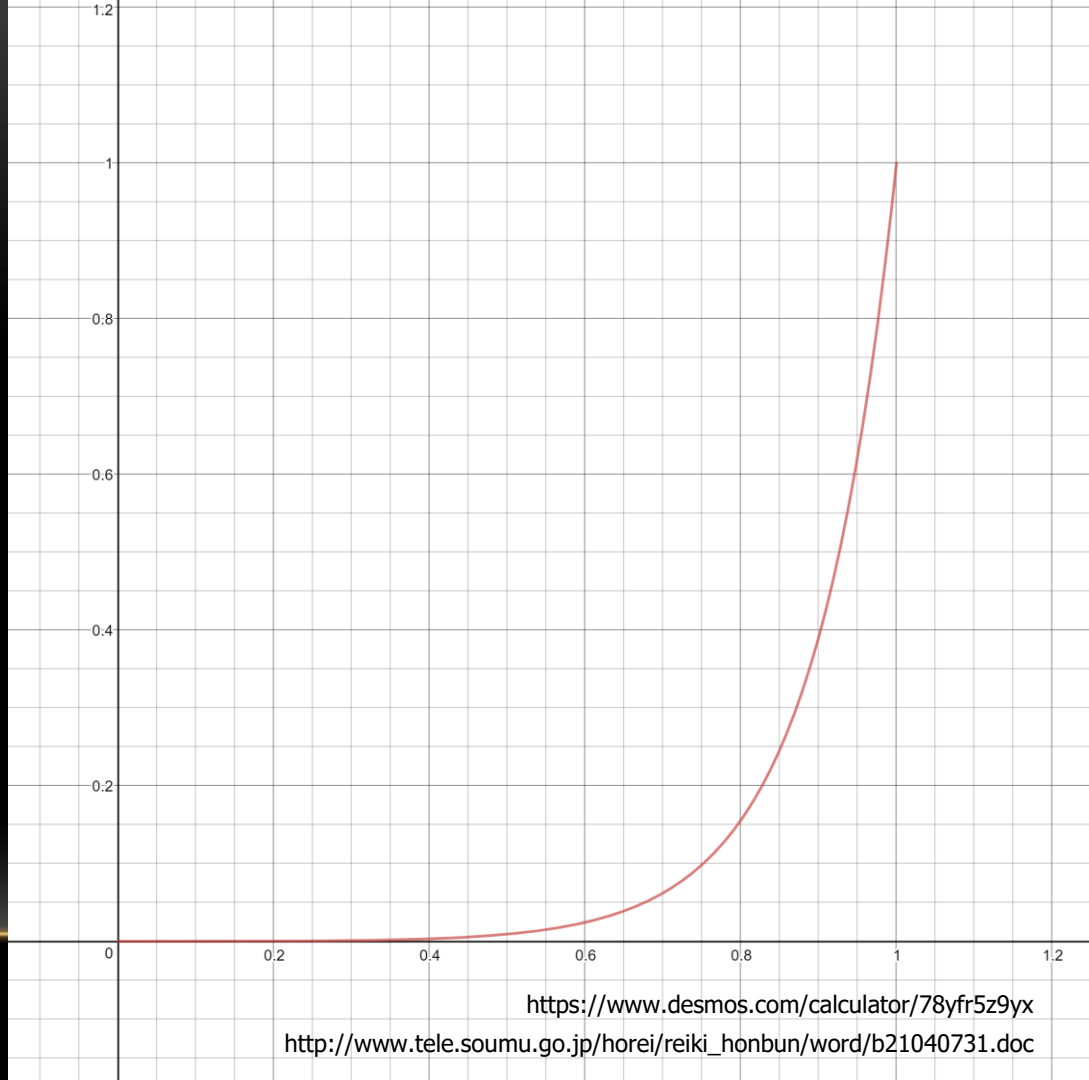
EOTF / OETF

- EOTF(Electro Optical Transfer Function)
  - 信号から輝度への変換関数

- OETF(Opto Electronic Transfer Function)
  - 輝度から信号への変換関数

HDR10のOETF

- “PQカーブ”
- “Perceptual Quantizer”
- 視神経の特性に沿っている
- [0, 10000] cd/m^2を
  [0, 1]の信号に変換する。

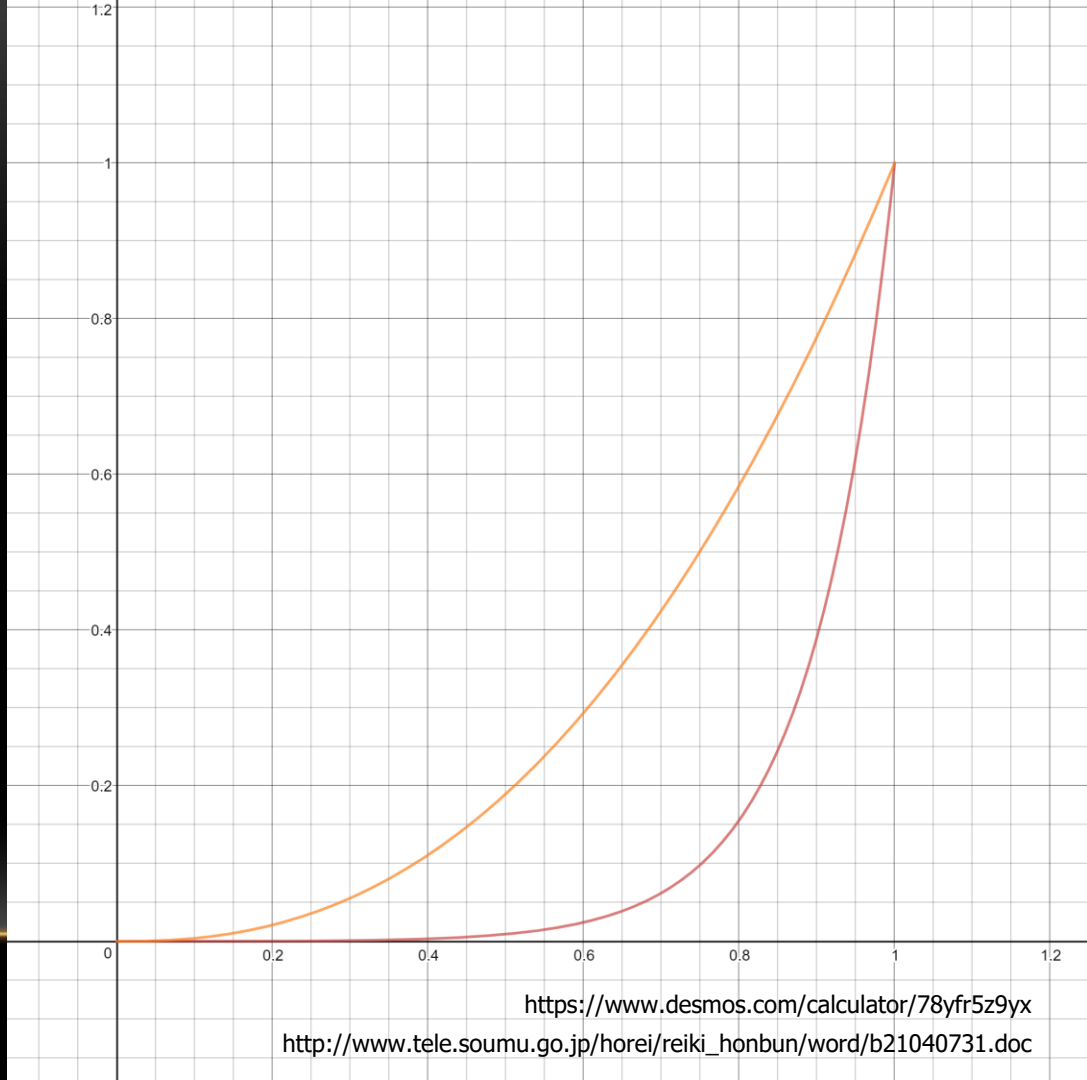


https://www.desmos.com/calculator/78yfr5z9yx

http://www.tele.soumu.go.jp/horei/reiki_honbun/word/b21040731.doc

SDRとの比較

- SDR : ガンマ2.4
- HDR : PQ

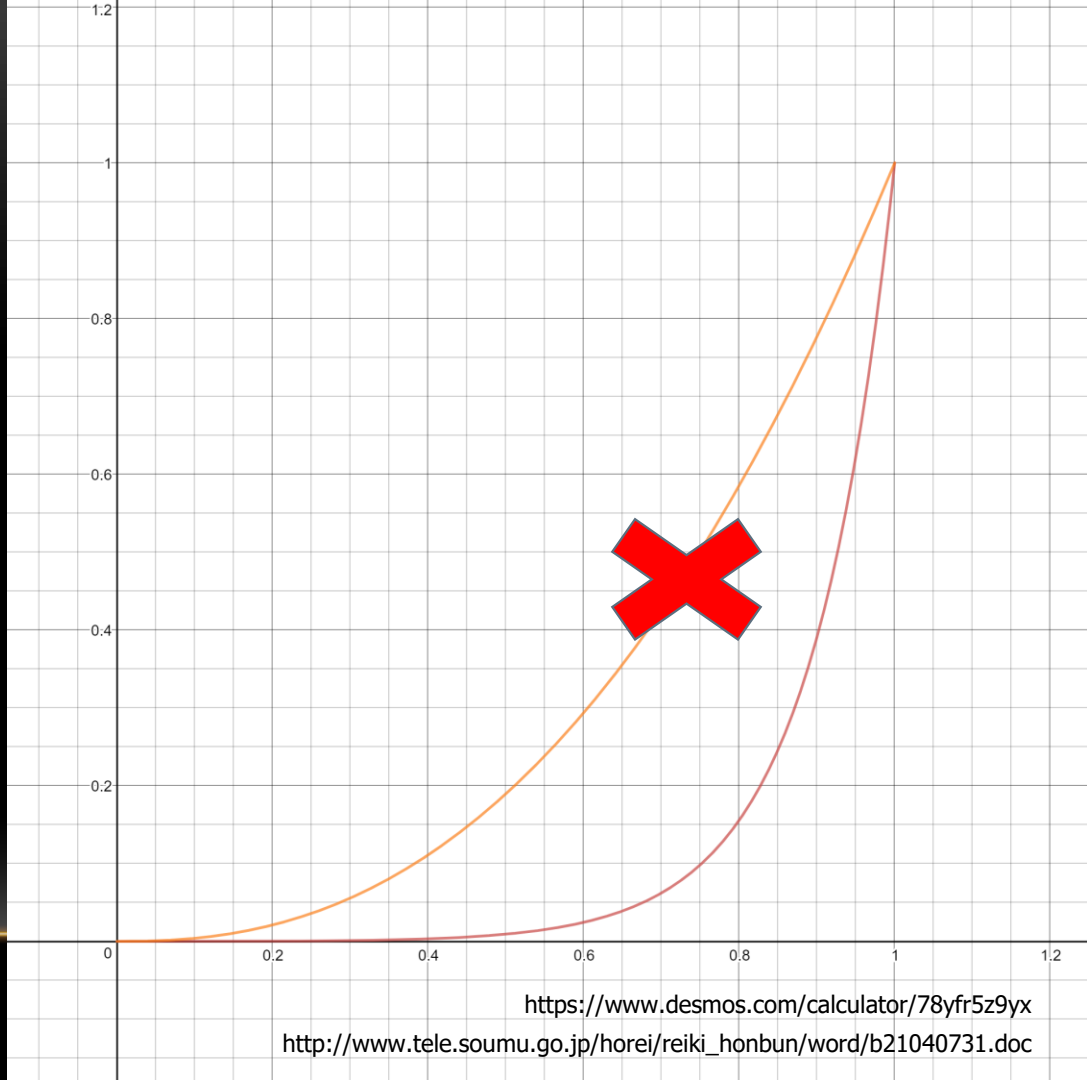


https://www.desmos.com/calculator/78yfr5z9yx

http://www.tele.soumu.go.jp/horei/reiki_honbun/word/b21040731.doc

SDRとの比較

- SDR : 100 nit
- HDR : 10,000 nit

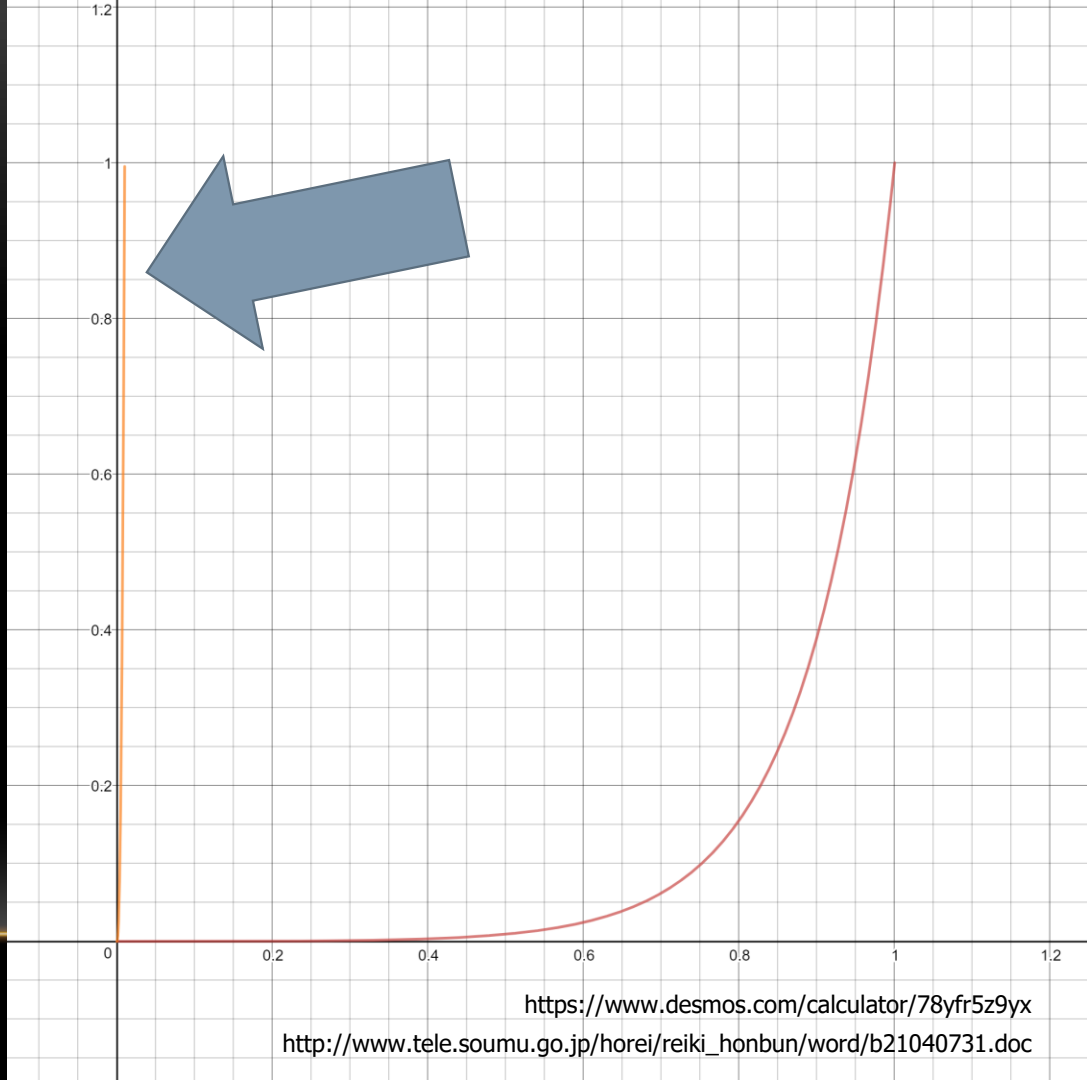


https://www.desmos.com/calculator/78yfr5z9yx

http://www.tele.soumu.go.jp/horei/reiki_honbun/word/b21040731.doc

SDRとの比較

- 100倍
- HDRすごい



https://www.desmos.com/calculator/78yfr5z9yx

http://www.tele.soumu.go.jp/horei/reiki_honbun/word/b21040731.doc

HDRは明るさ＋色

- SDR(sRGB)
  - OETF : sRGB / Gamma
  - Color : Rec.709
- HDR(HDR10)
  - OETF : PQ
  - Color : Rec.2020

https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.709-201606-I!!PDF-E&type=items

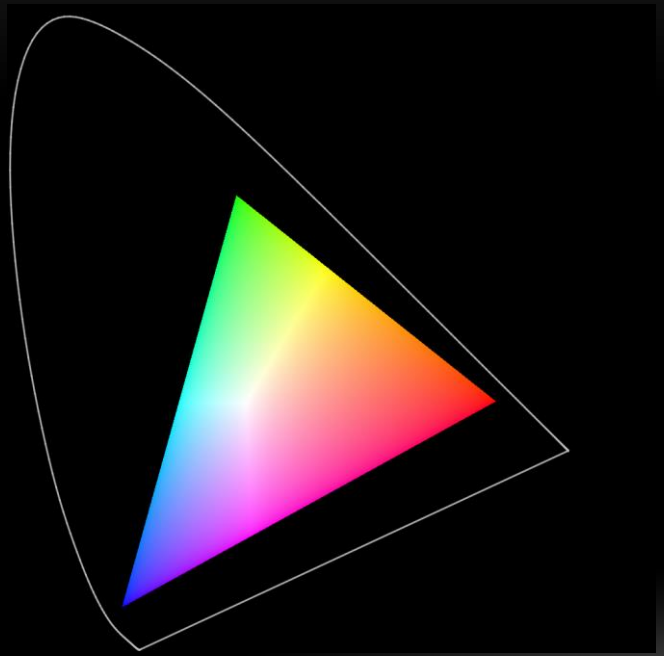
https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.2020/en

色空間

- 右図は人類の見える色の範囲
- “xy色度図”
- CEDEC2016
  “ゲームのための色彩工学”
  もご参照ください。
- 広いほど鮮やか

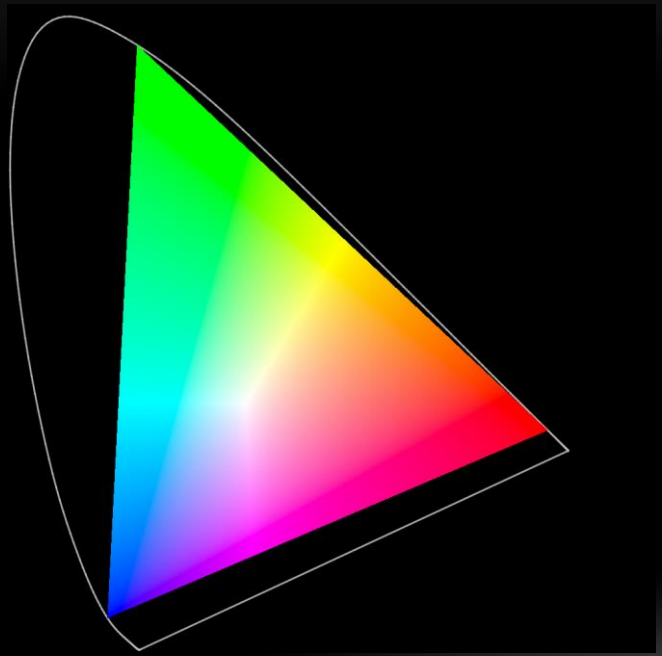
https://www.slideshare.net/nikuque/color-science-for-gamesjp

sRGB(Rec.709)



	x	y
White	0.3127	0.3290
Red	0.64	0.33
Green	0.30	0.60
Blue	0.15	0.06

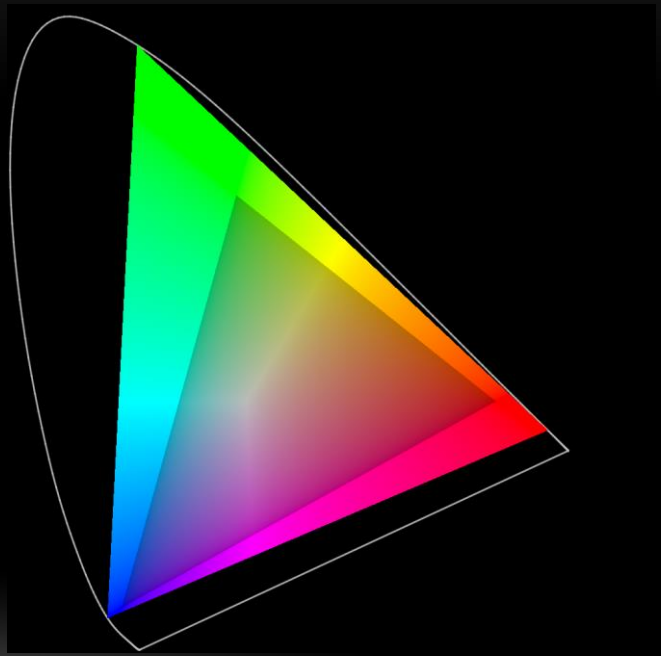
HDR10(Rec.2020)



	x	y
White	0.3127	0.3290
Red	0.708	0.292
Green	0.170	0.797
Blue	0.131	0.046

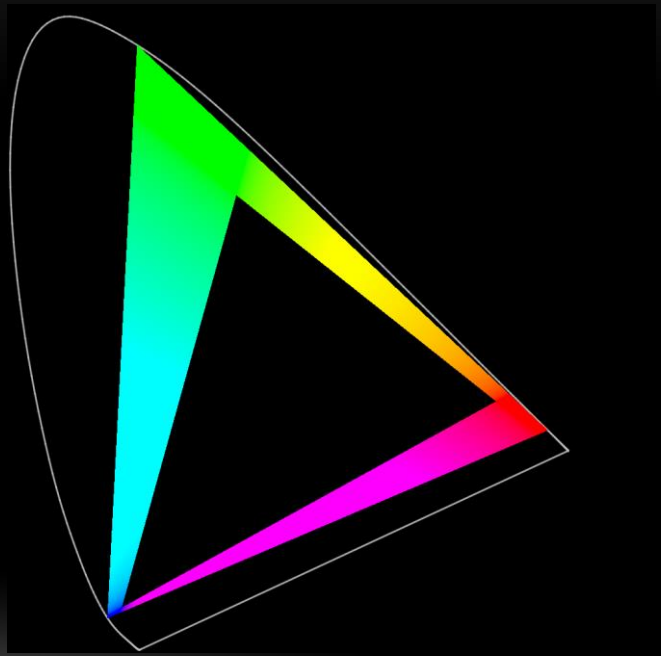
Rec.2020 / Rec.709

- 赤・青・緑ともにすべて広い
- より鮮やかな色が表現できる



“色域外”

- 色域の外の色は対応した
  デバイスにしか表示できない



テレビについて詳しくなりましたね

今まで通りの作り方から、HDRへの拡張

SDRファーストの時代

GTSPORT HDR対応の歴史

- GTSPORTは当初HDR TV非対応でした。
- まず先に”Scapes”がありました。
  - 実写の写真と物理ベースレンダリングを組み合わせた新しいフォトモード
  - この当時のアセットは、どれも広色域ではありません

HDR対応へ

- Scapesを見たテレビ関係のメーカーの方から
  - “HDR出せるテレビ、作ってるんですよ”
  - “HDRテレビに映像、出してみませんか”
- というお誘いが。

HDR対応へ

- Scapesを見たテレビ関係のメーカーの方から
  - “HDR出せるテレビ、作ってるんですよ”
  - “HDRテレビに映像、出してみませんか”
- というお誘いが。

- もちろんやります。やらせてください。

HDR対応へ

- Scapesを見たテレビ関係のメーカーの方から
  - “HDR出せるテレビ、作ってるんですよ”
  - “HDRテレビに映像、出してみませんか”
- というお誘いが。

- もちろんやります。やらせてください。
- だから機材を貸してください…

当時のアセット等の状況

- 車両モデルマテリアル : Rec.709, sRGB
- Scapes画像 : Rec.709, sRGB
- レンダリング : Rec.709 リニア > sRGBに出力

- 全部SDRでした。

輝度だけHDR

- フレームバッファは当時からHDR10を満たせるレンジがあった
- まずはRec.709でレンダリングしてRec.709 > Rec.2020に変換してPQカーブで出力してみる

- いわゆる “輝度だけHDR”

最初の結果

- とても良かった
  - 車両表面の反射、逆光の明るさがいい
  - リアルタイムにこれが動くのが信じられない

- プロトファームウェア入りのテレビで見た
- HDR沼に足を突っ込んでしまった

良かった理由

- 素材をわりとそのまま出した
  - 高輝度部分がきちんと残っていた

- レンダリングがかなり正確だった
  - 反射表面などの素材感に説得力があった

不満だった点

- 色が浅い
  - HDRテレビはSDRテレビよりも比較的、色がそのまま出る
  - SDRのド派手な色に慣れてしまっていた
  - Rec.709の色はやっぱり狭かった

- 高輝度部分の色飽和が不自然だった

(注意) 2015年当時の絵です

(注意) 2015年当時の絵です

MICHELIN
R8
Audi Sport
ZURICH
28

ネイティブHDRへの決断

- クルマのマテリアルはスペクトルで採ってある
- 背景素材だってRAWだから、709よりは広色域だ
- なんならレンダリングも広色域にしよう！
- ちゃんとHDRに対応しないとより良い絵は出ないのでは？という思い
- というか、その絵が見てみたい…！

- ネイティブHDR対応をすることを決意した

広く作って、小さく収める

HDRファーストでの製作

広色域パイプライン

- 最初にライティングのための色空間を検討した
  - scRGB?
  - CIE XYZ?
  - ACES cg?
  - Rec.2020?

scRGB

- 負の領域を許容したsRGB。
- 広色域かつ高ダイナミックレンジが表現できる。

- しかし、負が扱えるちょうどよいフレームバッファが存在しない
- ということで、この案は無し。

CIE XYZ

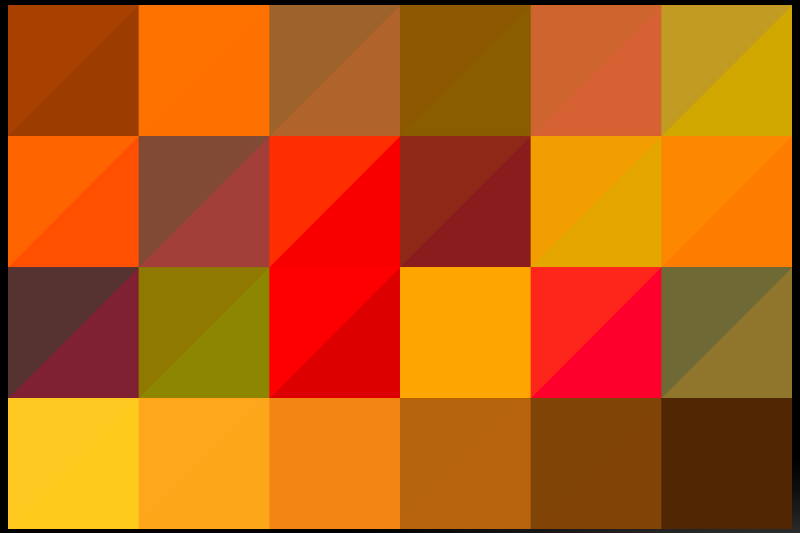
- CIE XYZ色空間でライティングしてからRec.2020に落とす
- 一番広い

- ライティング誤差が大きかった
- 色空間が広すぎて、既存素材を変換すると劣化が目立つ
- 白色がHDR10の白色点と違う

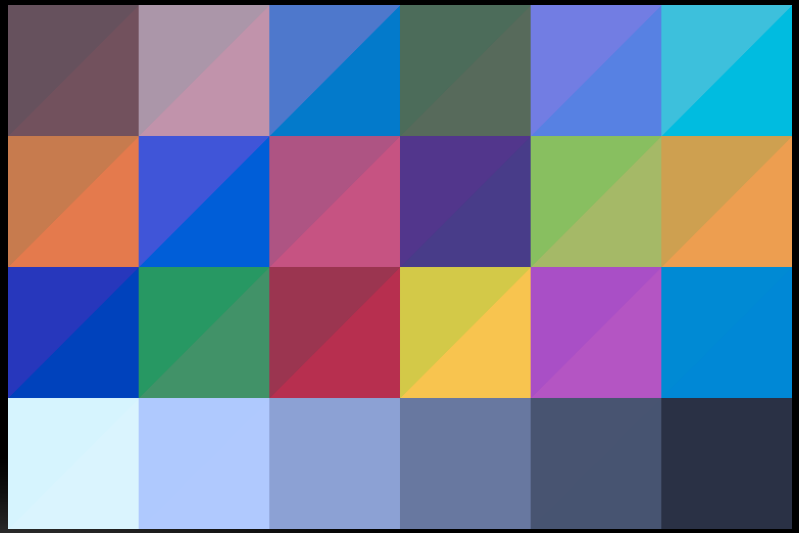
- などの理由で、却下

(左上)フルスペクトル
(右下) XYZでライティング

2000K 黒体放射



9000K 黒体放射



ACES

- アメリカ映画芸術科学アカデミーが策定している色システム
  - 素材収録用のAP0(ACES 2065)
  - レンダリング用のAP1(ACES cg)
- 標準の色変換が決まっている
  - RRT(Reference Rendering Transform)
  - ODT(Output Device Transform)
- RRT, ODTともにマジックナンバーが多い
- 色調が自由ではない、ので却下

http://www.oscars.org/science-technology/aces/aces-documentation

Rec.2020

- HDR10の色空間 Rec.2020 でライティングを行う
- ほぼそのままHDR10テレビに出力できる
- sRGBと同じ白色点なので、既存素材がそのまま利用しやすい
  - 変換するだけでそれなりに使える

- より広い規格が出てきたときに再度移行しないといけない
- 既存研究がなかったので、未知数だった
- 検討した中ではこれが一番良かった。採用。

リードエンジニアの当時の発言

高野 修一：

移行しちゃった！
今後は世の中bt2020です。
こわい。

広色域のメリット・デメリット

メリット

- 明らかにクルマなどの機械部品の色再現が良くなった。
- (255, 0, 0) のような極端な色が減る

NO
PARKING
TTS

メリット2

- 色調補正で救える範囲が圧倒的に広がった
- 絵が様々な加工に耐えるようになった

例えば色温度補正

- sRGBの素材はすぐに色域外に当たってしまう
- Rec.2020で素材を準備すると、2300K～12000Kくらいまで粘る！

- ヨーロッパの夜景が多かったのでとても助かった
  - 白熱灯などのオレンジ色の光がとても多かったため
  - 取材の時にライトを焚けない場合もある

デメリット

- 確認用モニターが存在しない！
- HDR10がフルに出せるモニターはいまだ存在しない

- アーティストは何らかの形で変換して確認せざるを得ない
  - 広色域からの変換の保証はエンジニアの責任になる

- 複数の色域のファイルが混在することになる
  - 混ぜて扱ってしまうリスクがある。

つまり広色域レンダリングとは

- より色が広く
- より素材が柔軟で
- 変換に気を遣う

- カメラのRAW撮影みたいなもの

Rec.2020に移行すると何が起きるか

Rec.709からRec.2020に移行すると

- 色域外の色がベタッとなってしまう
- 高輝度の部分にずっと色が残って不自然になる

Rec.709世界では正しく見えた画像

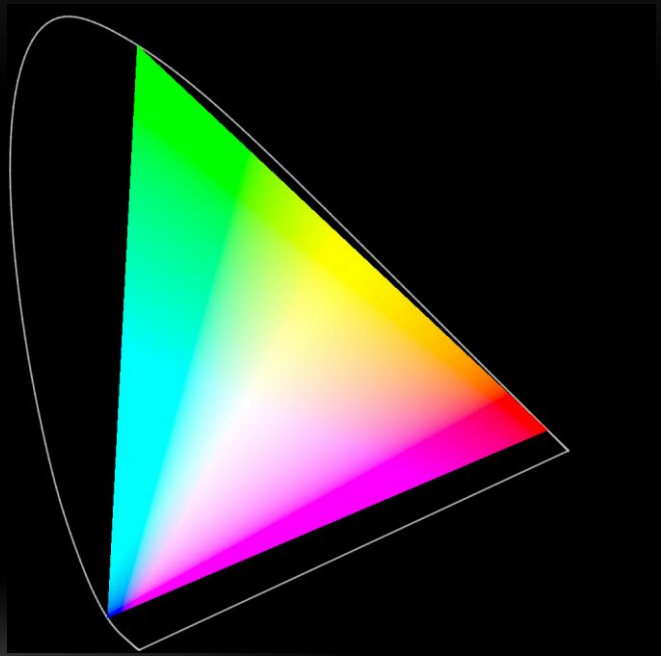
Rec.2020からRec.709への変換で原色付近がクリップしてしまう

黄色い部分はRec.709色域外の色

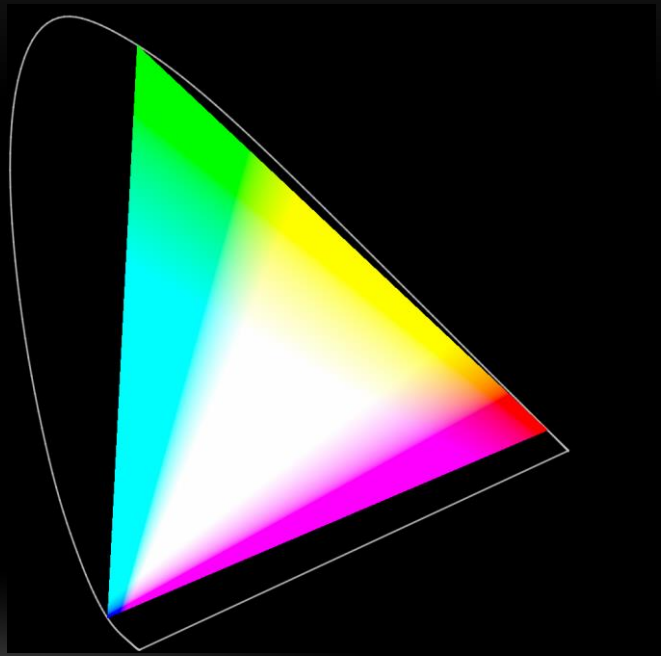
実例をもう一つ

色度図で見てみると

- Rec.2020の色度図
- Rec.709にそのまま割り当てる
- [0,1]にクリップ

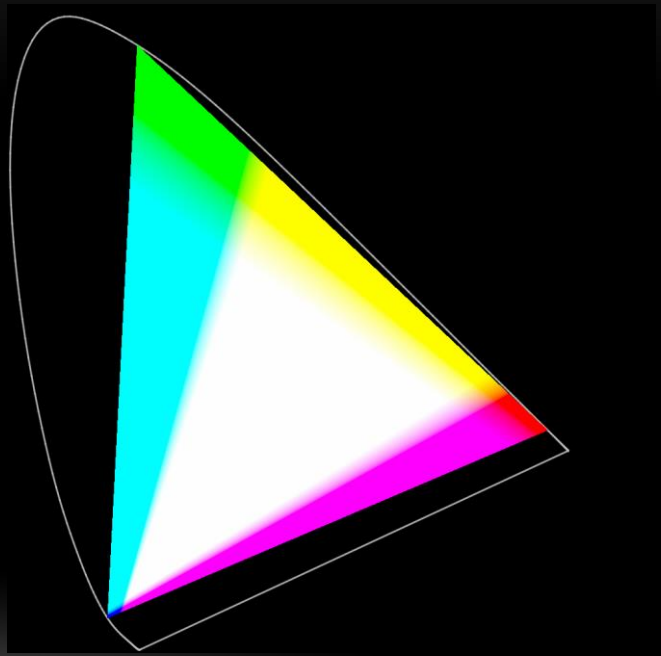


200nit



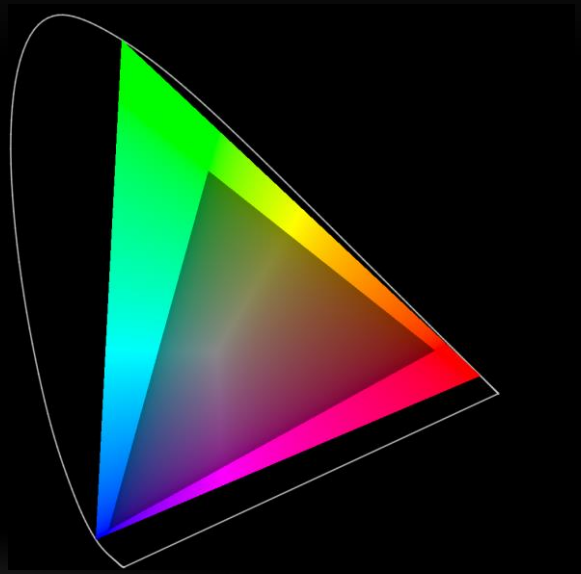
500nit

- 色域外色がクリップしていく

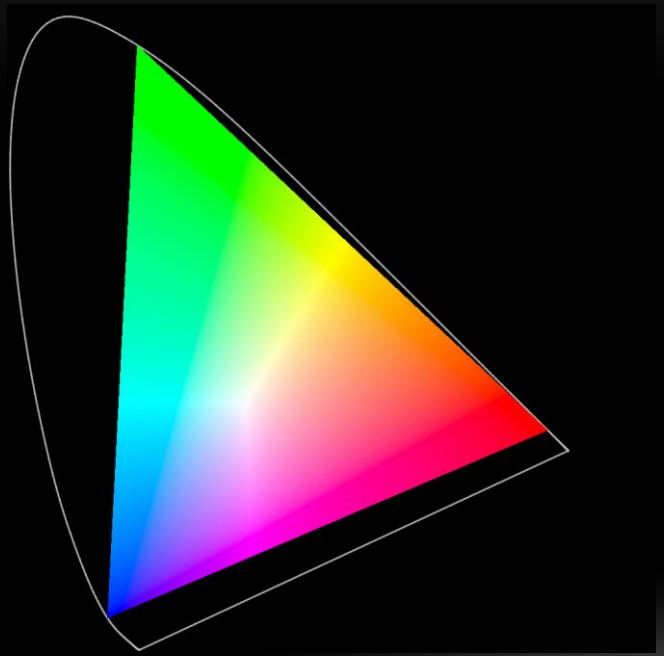


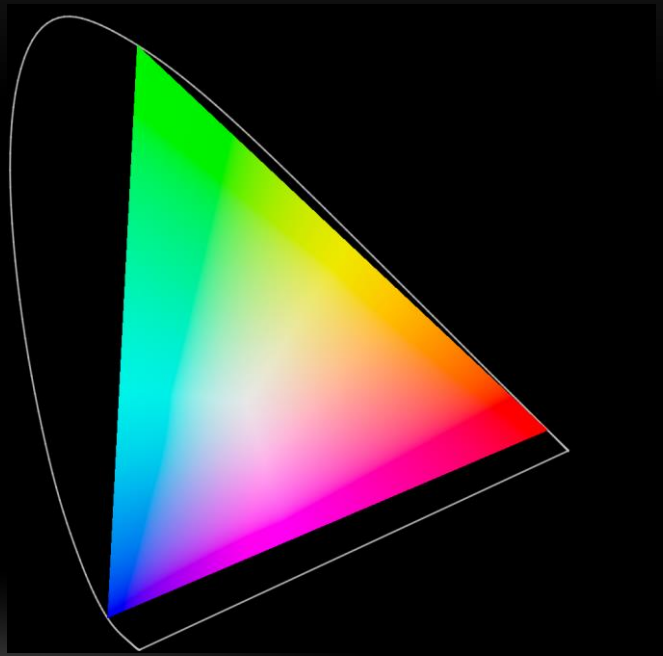
トーンマップが必要

- 違和感を減らすために
  色域外の部分を白くするような操作
- “tonemap” と呼ばれる

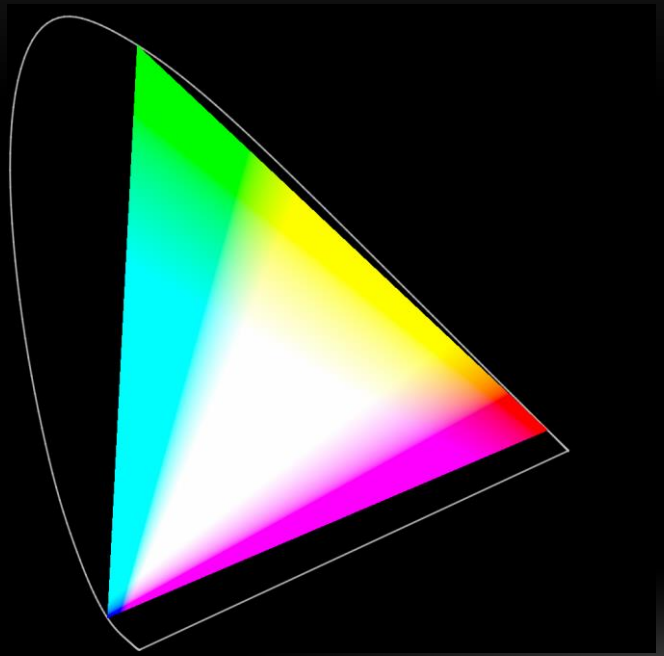


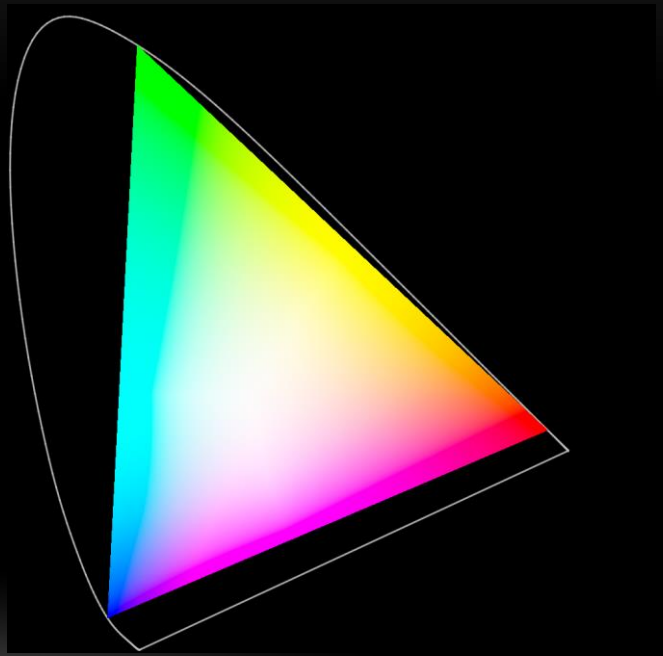
100nit. トーンマップの無しと有り



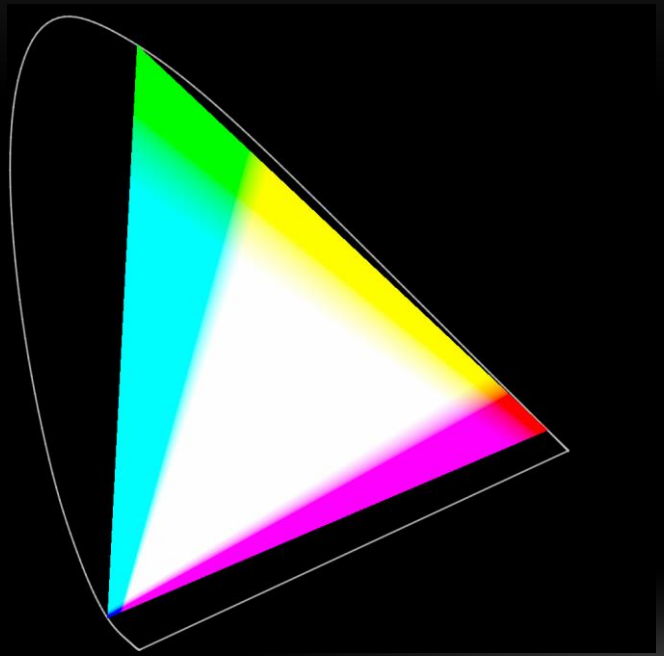


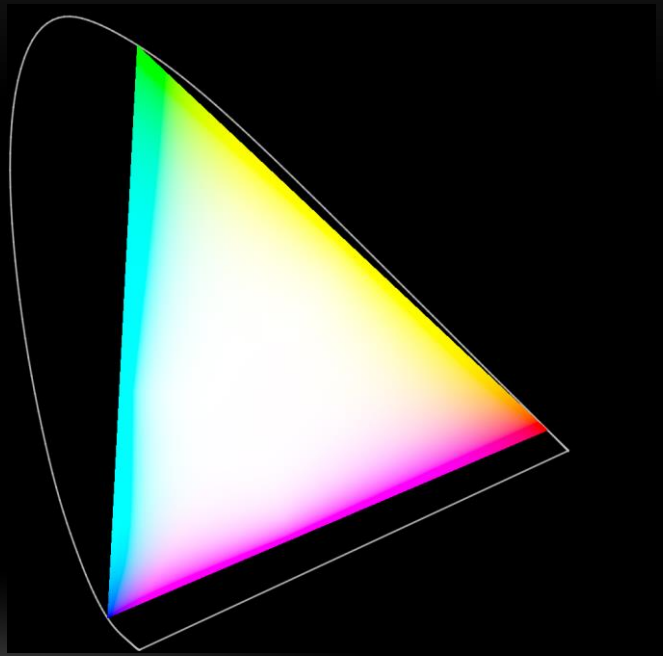
200nit



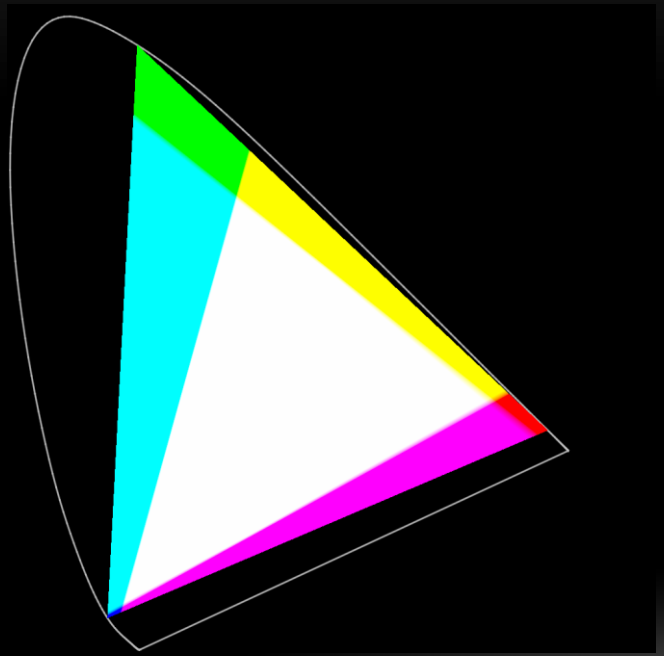


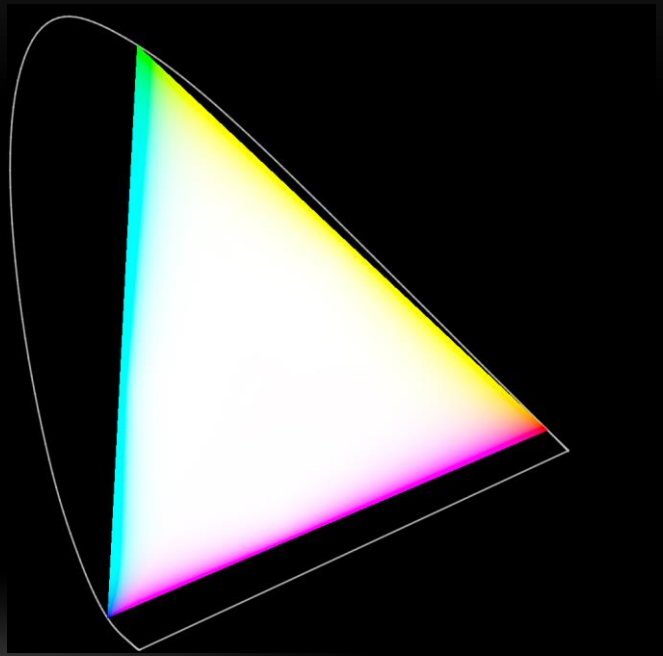
500nit



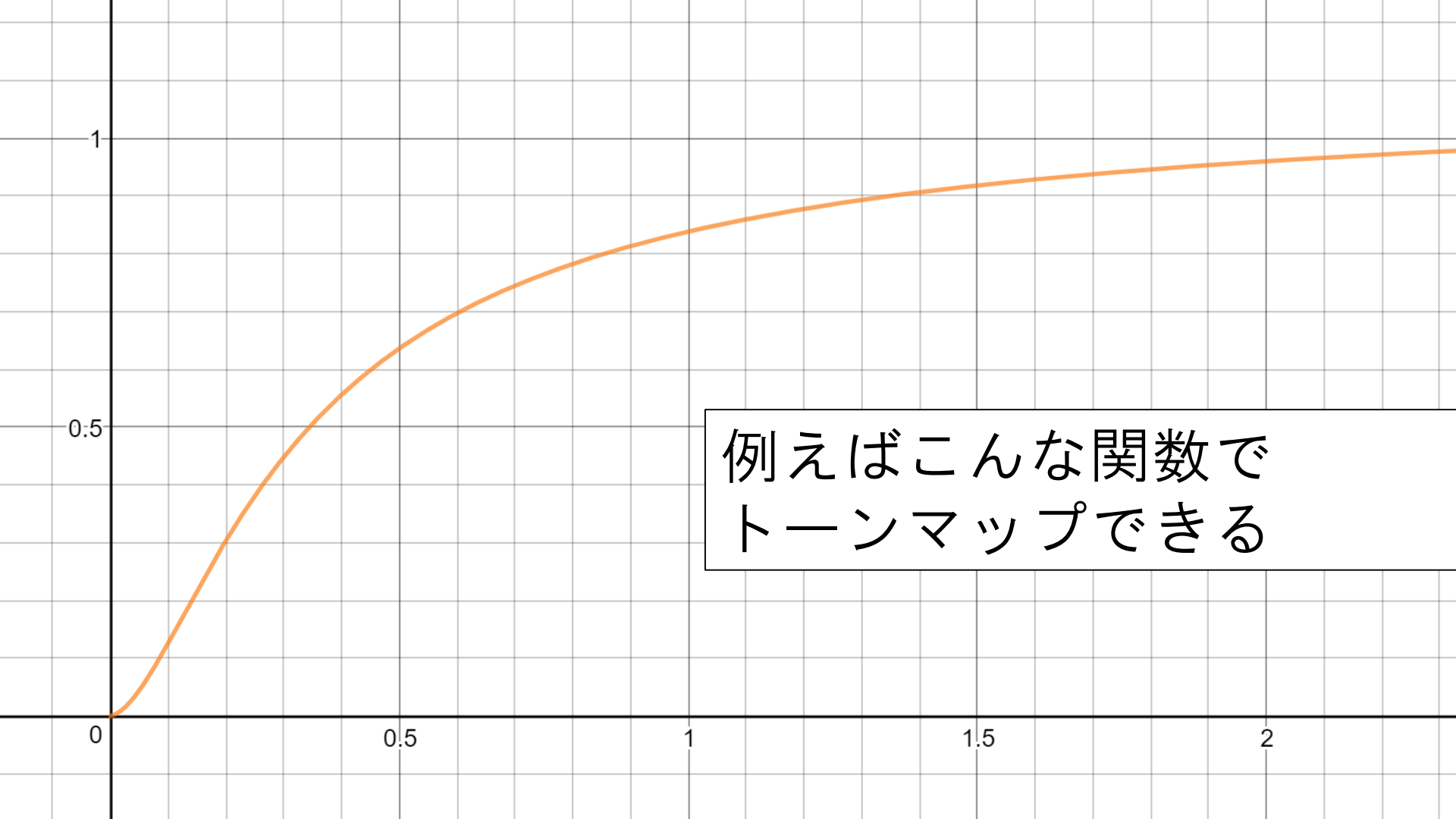


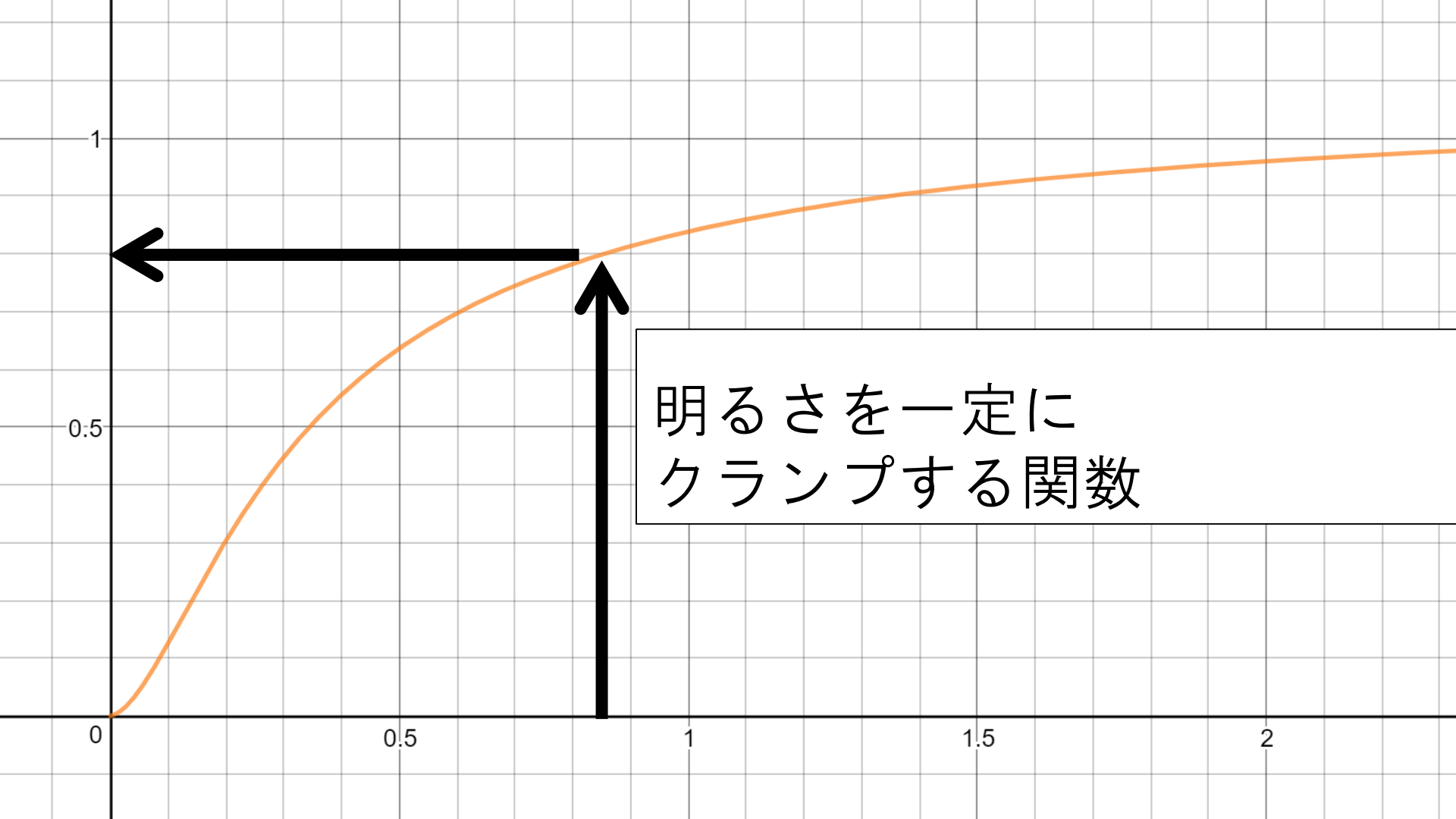
1000nit. トーンマップの効果で滑らか



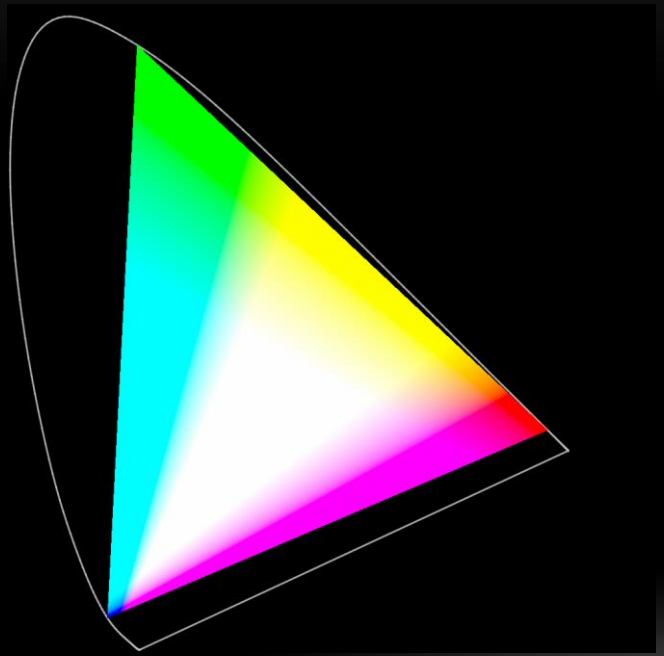


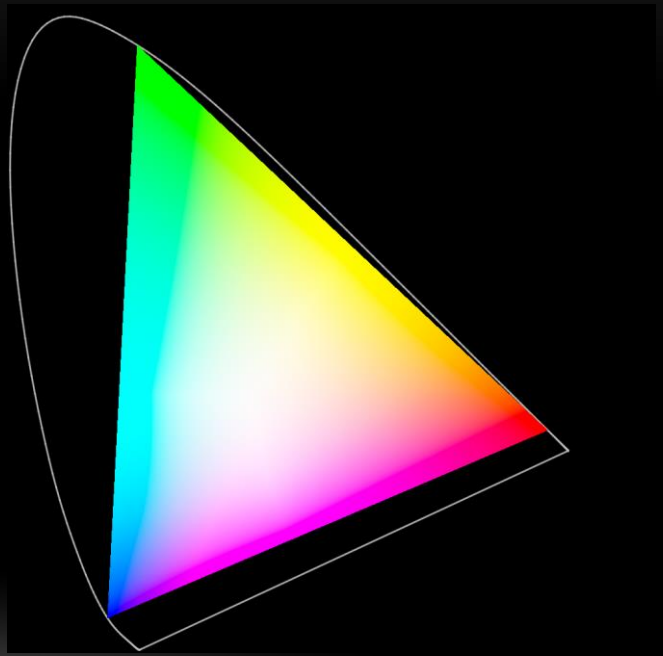
どんなトーンマップを使うか


1
0.5
0
0.5
1
1.5
2
例えばこんな関数で
トーンマップできる


1
0.5
0
0.5
1
1.5
2
明るさを一定に
クランプする関数

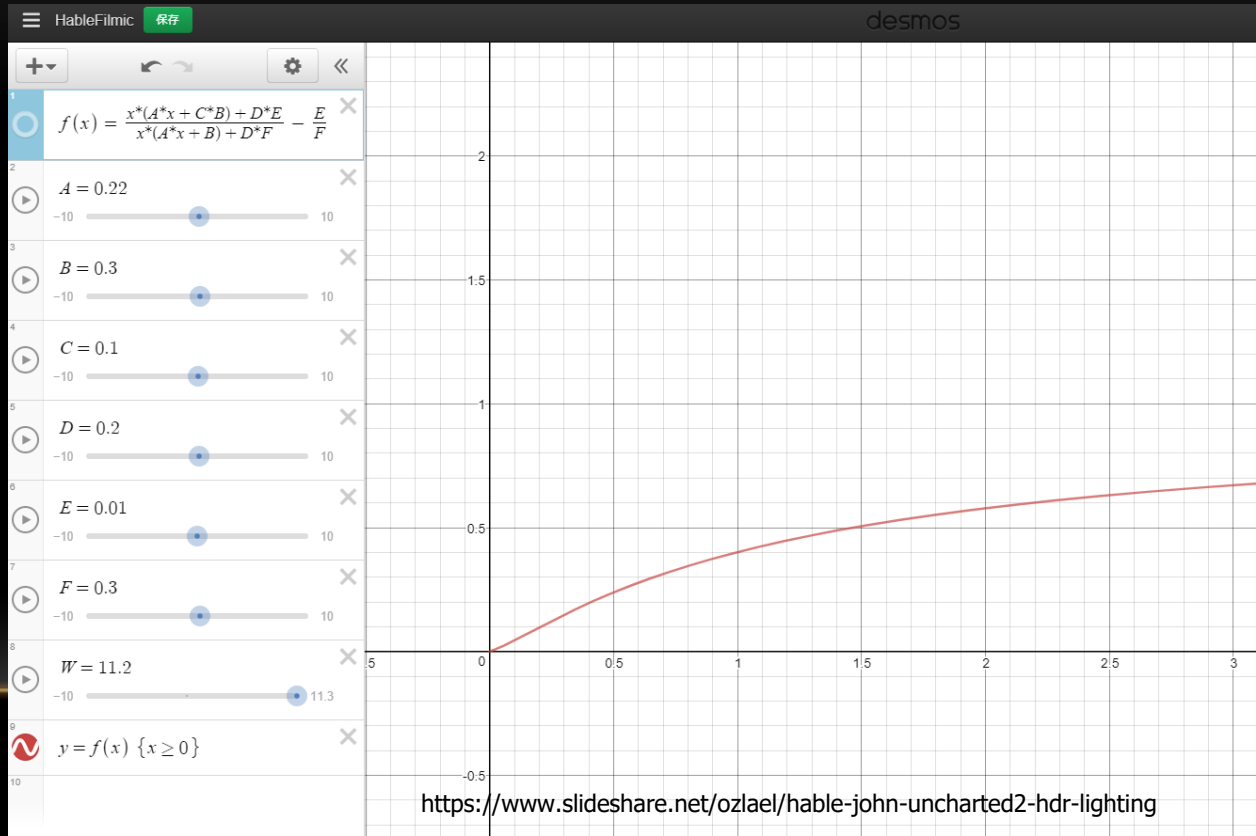
明るい部分が滑らかに白に近づく効果





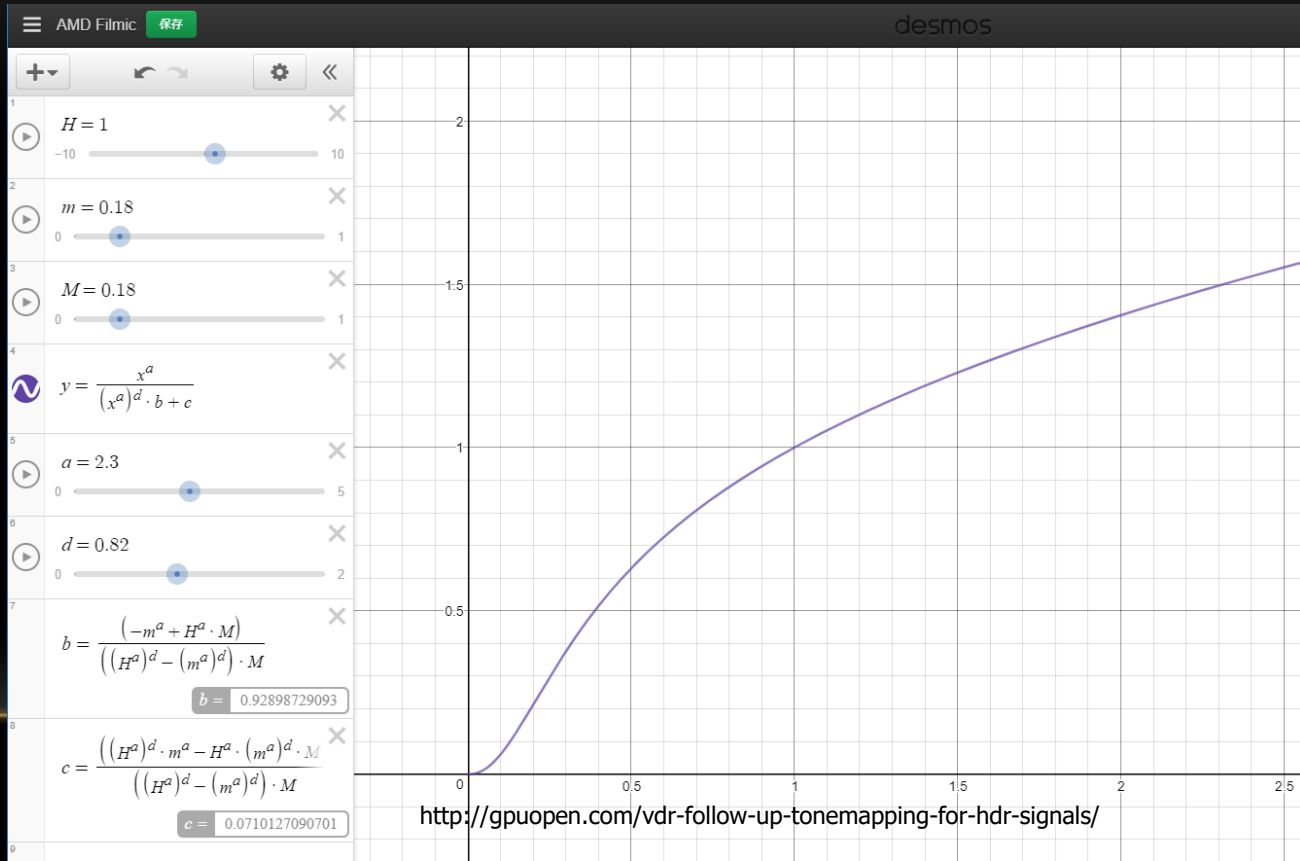
John Hable(NaughtyDog) Filmic

- とても浅い
- テレビが200nit想定？



AMD Filmic

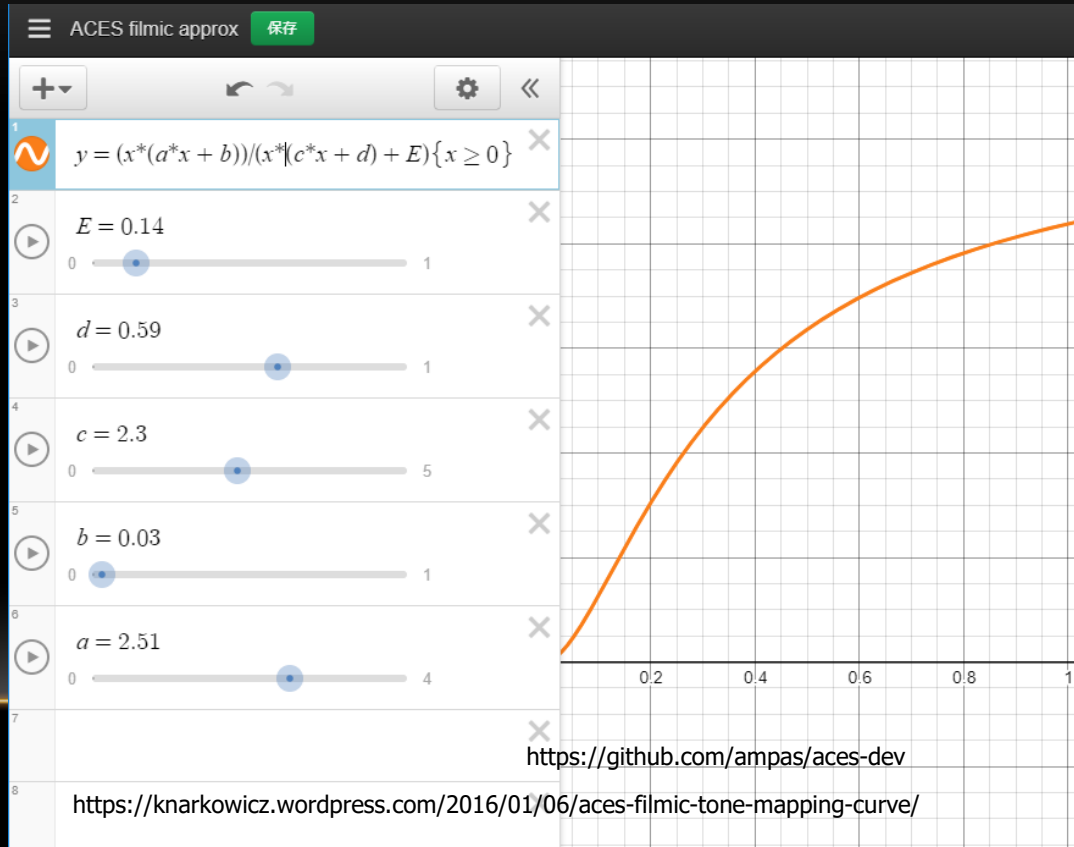
- [Timothy16]
- ピーク輝度可変
- 線形部分がない



http://gpuopen.com/vdr-follow-up-tonemapping-for-hdr-signals/

ACES RRT+ODT

- マジックナンバー多し
- いろんな人が近似をしてる
- 固定の数種類から選ぶ



全部を試した

- どれもパラメータの調整に難あり
- アーティストからの要望を満たせなかった

- その過程でアーティストが
  Naughty Filmicをコントロールできるように進化していた...

アーティストの希望

- 十分にリニアな中間区間
- コントラスト調整の効く黒
- なだらかな肩

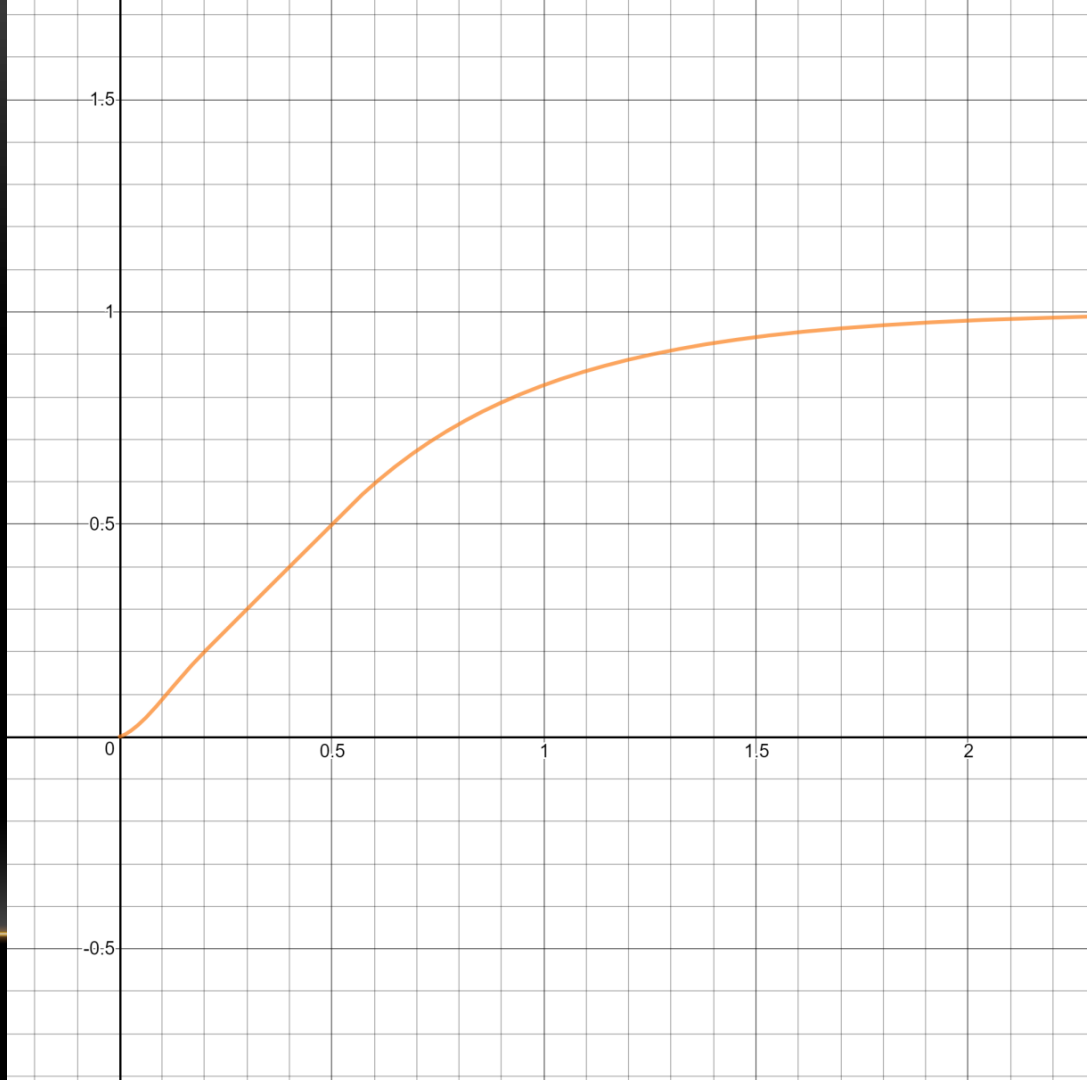
アーティストの希望

- 十分にリニアな中間区間
- コントラスト調整の効く黒
- なだらかな肩

- もういっそ、この三つを繋いだらいいのでは？

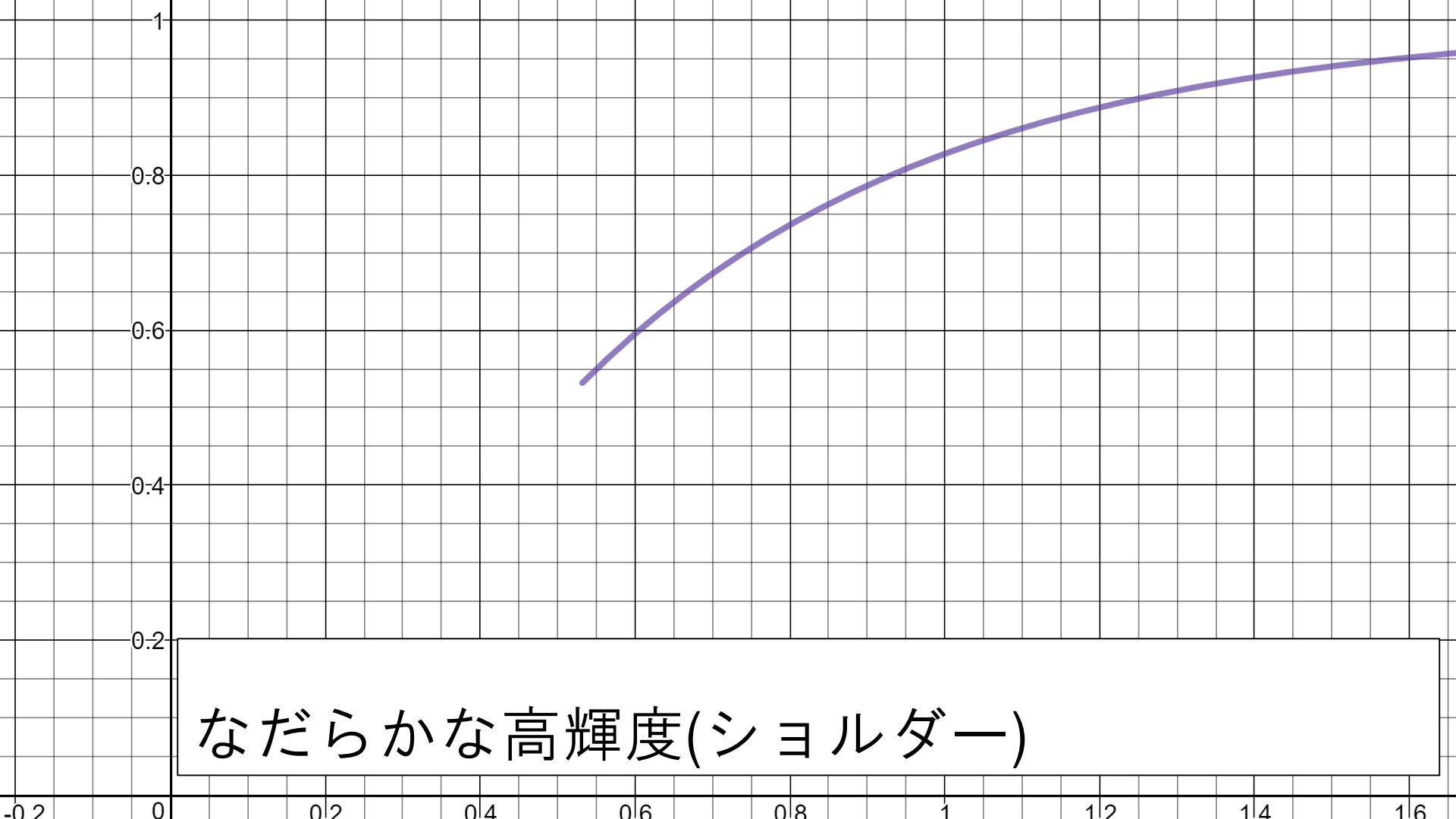
結果

- “GT Tonemap”
- 内部名 “Triple section”



黒のコントラスト(トーン)

完全に線形の区間(ミッド)

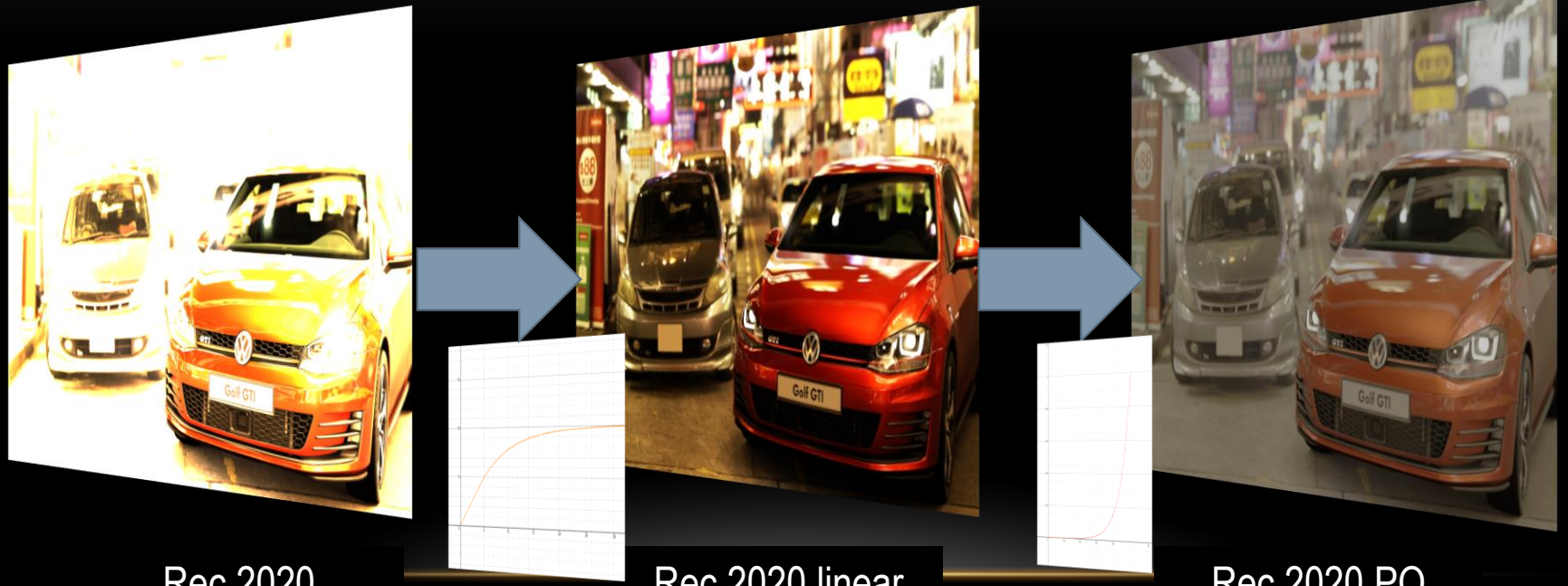

1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
なだらかな高輝度(ショルダー)

この3つの区間が名前の由来
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6

式はDESMOSをご参照ください

https://www.desmos.com/calculator/et1qmcg10s

GT Tonemap (HDR)



Rec.2020
linear

Rec.2020 linear
Tone mapped

Rec.2020 PQ
Tone mapped

GT Tonemap (SDR)

Rec.2020
linear

Rec.2020 linear
SDR Tone mapped

Rec.709
sRGB

実例で比較してみる
高輝度に注目

650S
トーンマップあり

トーンマップ無し
650S

トーンマップ無し
トーンマップあり
650S

トーンマップ無し
トーンマップあり

トーンマップあり
ROADSTER

トーンマップ無し
ROADSTER

トーンマップ無し
トーンマップあり

トーンマップ無し
MICHELIN
R8
Audi Sport
ZURICH
28

色転び(Hueシフト)

- R,G,Bそれぞれにトーンマップがかかる
- 高輝度グラデーションの色相がねじれてしまう

AMG
GT S
AMG

AMG
AMG

ROADSTER

ROADSTER

色相が動いてしまう

現実のカメラに立ち返る

- ゲームの出力画像は、基本的にはカメラのシミュレート
- では、現実のカメラではこういう部分はどうなっている？

カメラでも色相は動く

つまり…

色が転んでる...

ではなくて

自然でいいね！

GT Tonemap結論

- シンプルイズベストだった。
- SDR出力の時はトーンマップ後にRec.2020>Rec.709変換をかける。

SDRとHDRの互換性

SDRのユーザーはとても大事です

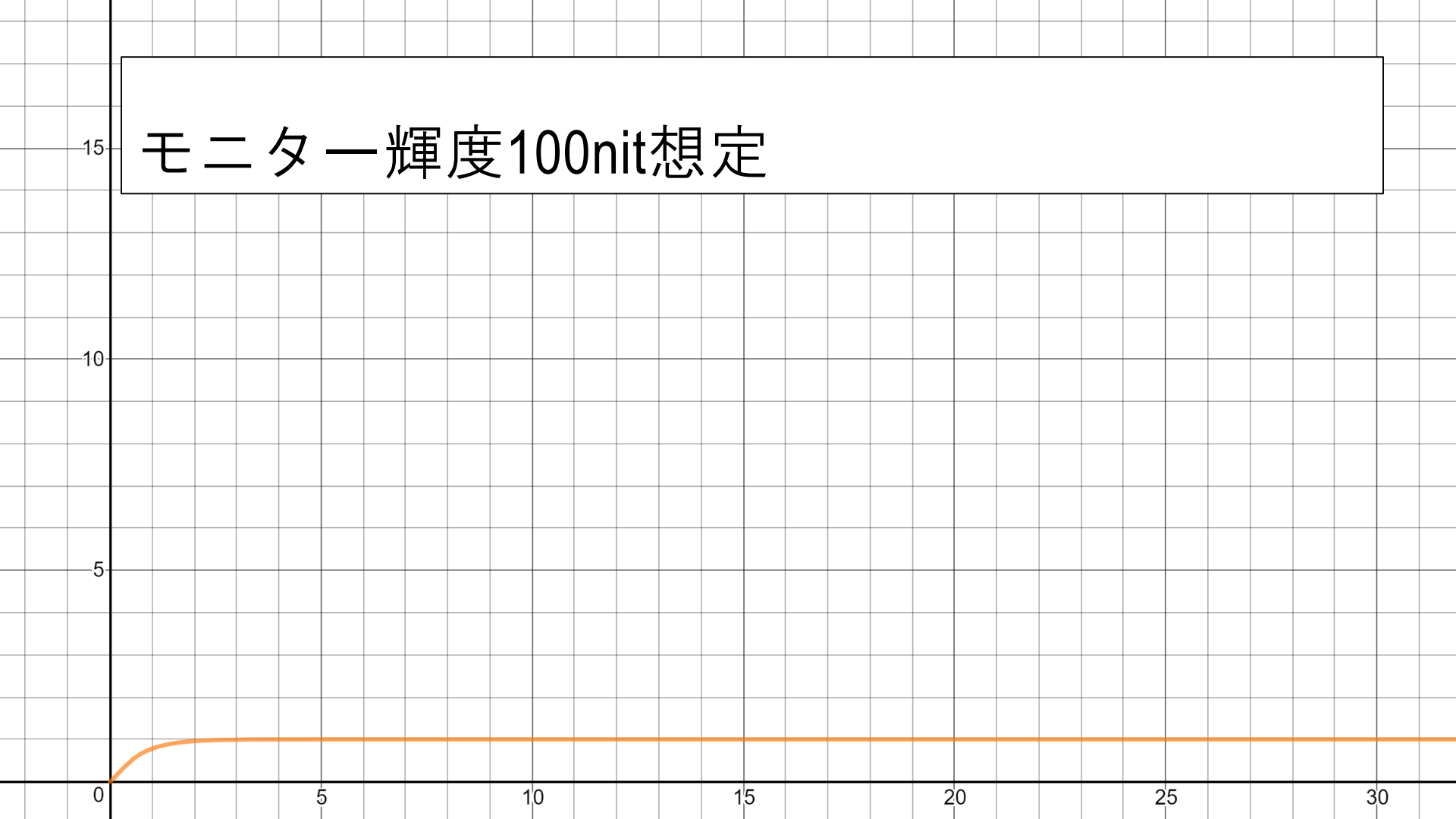
- 多くのテレビはいまだにSDRメイン。
- HDRテレビは普及しつつあるが、それでもマイノリティ。

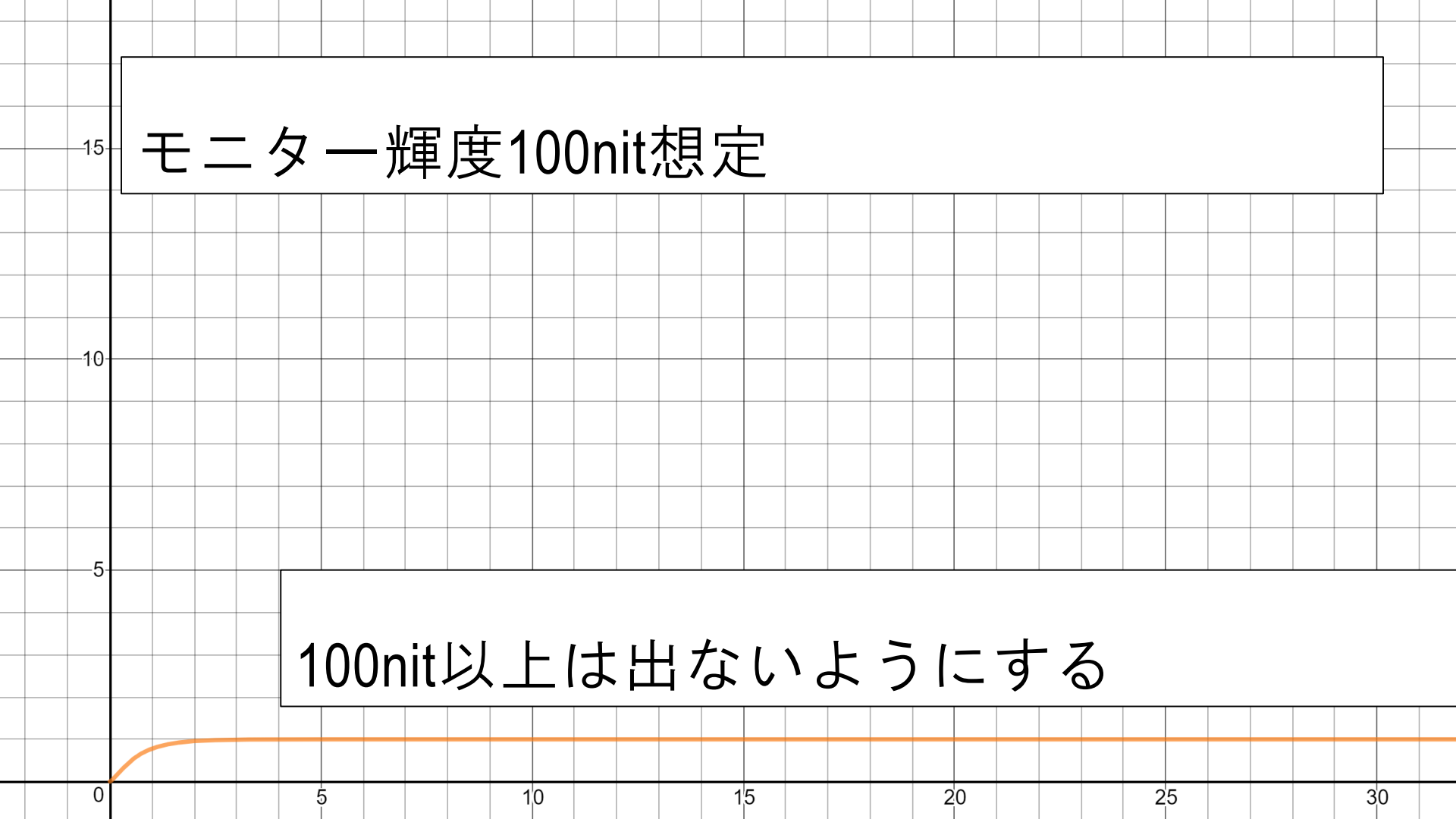
- 互換性を保ちつつ、良い絵を両方に出したい。

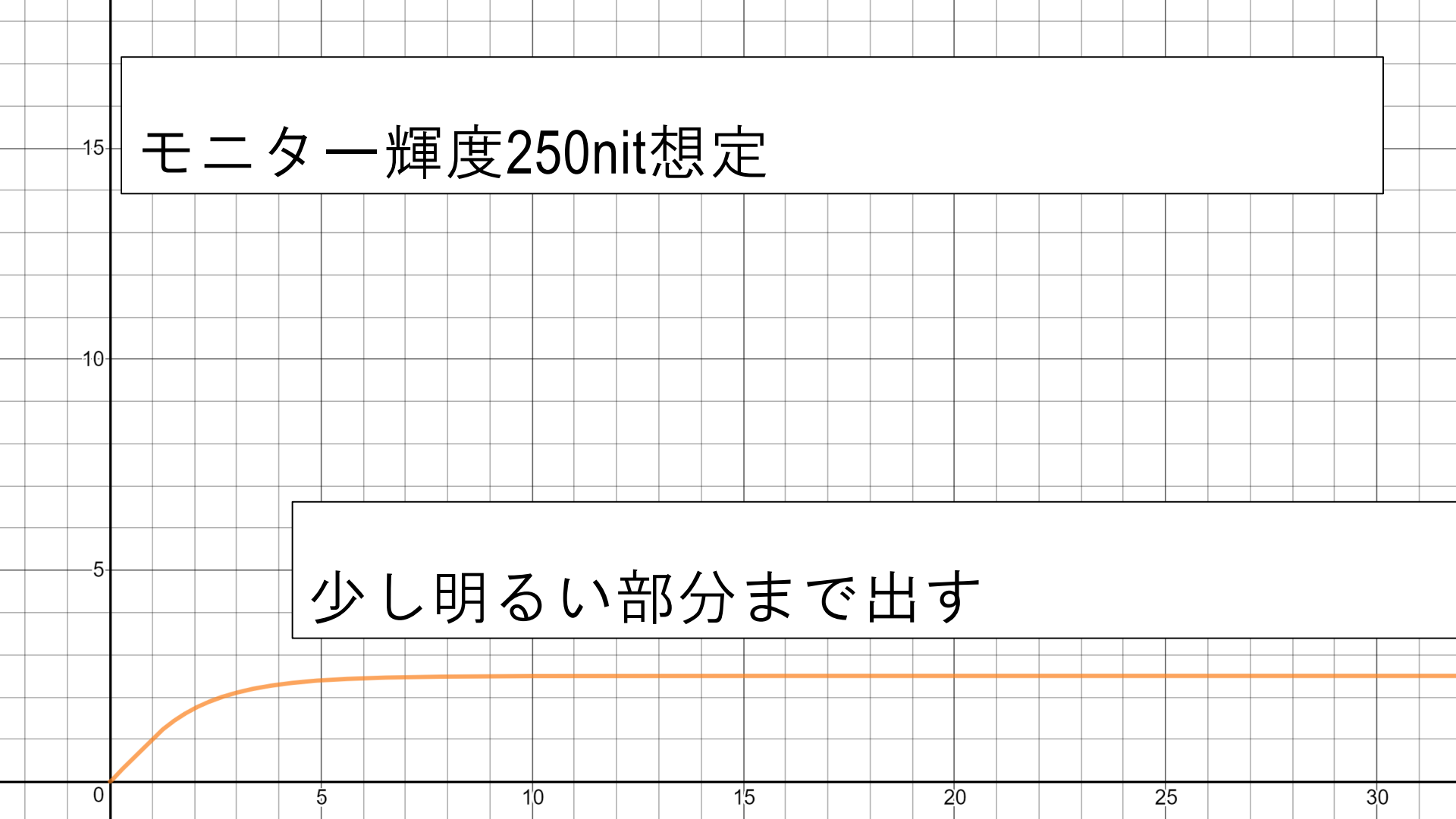
HDR/SDR両対応トーンマップ

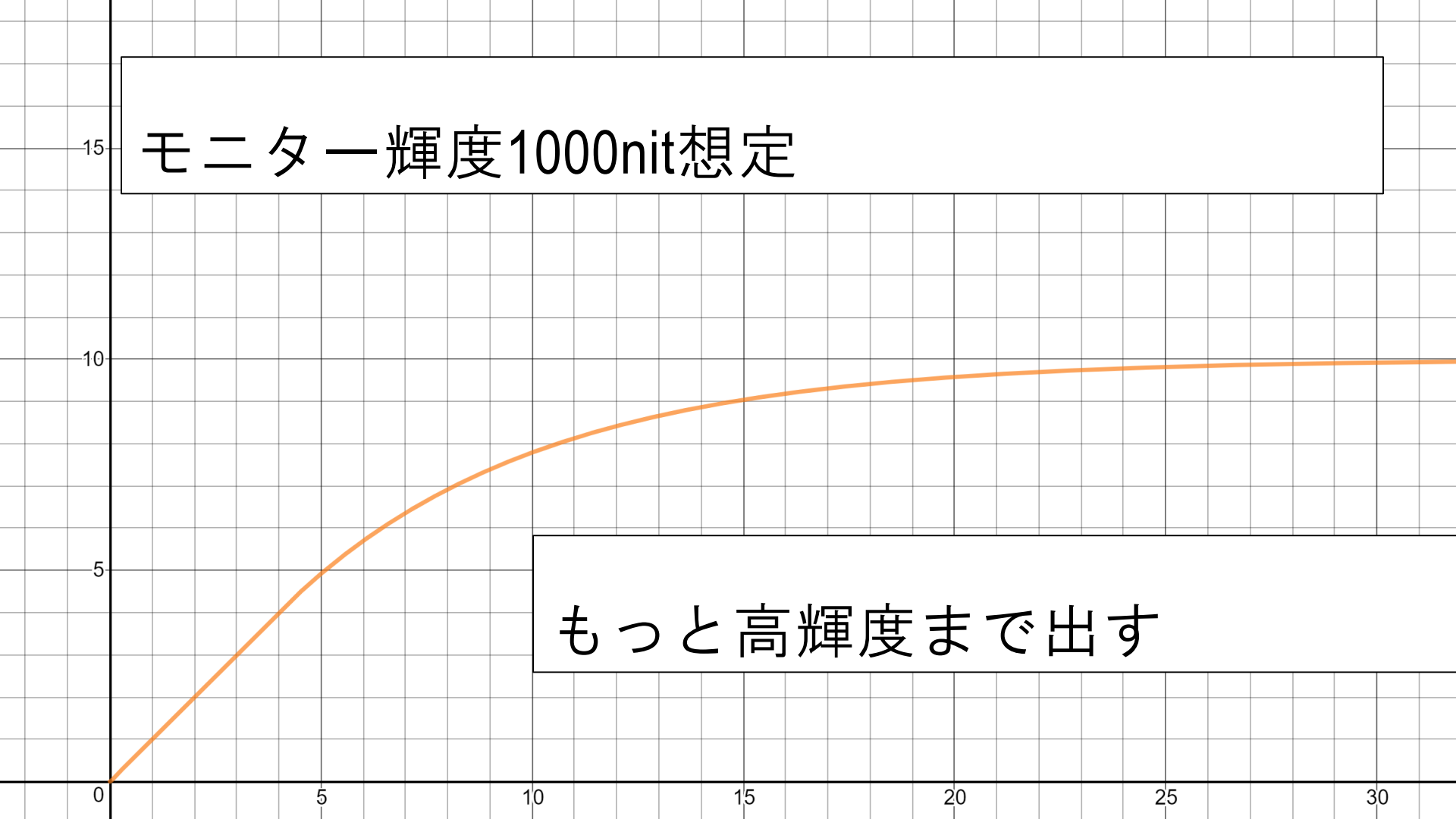
- GT Tonemapは最大輝度をパラメトリックに変更可能
  - 様々な性能のHDRテレビで同じカーブを適用できるために

- トーとミッドは常に同じ線形を維持する
  - SDRでもHDRでも、適正露出域は同じ雰囲気が維持される


モニター輝度100nit想定
15
10
5
0
5
10
15
20
25
30


モニター輝度100nit想定
100nit以上は出ないようにする
15
10
5
0
5
10
15
20
25
30


モニター輝度250nit想定
少し明るい部分まで出す
15
10
5
0
5
10
15
20
25
30


モニター輝度1000nit想定
もっと高輝度まで出す
15
10
5
0
5
10
15
20
25
30

SDRブーストへの対処

- 互換トーンマップでSDR/HDRを切り替えると、HDRが明らかに暗い。

- SDRテレビが、輝度と色をブーストしまくっている。
  - 「画改」と呼ぶらしい

どれくらいブーストされているのか？

- ブーストを打ち消すスケーリングを入れれば輝度の印象が合う
- いくつかのテレビを計測した
- 最大で輝度が5倍、色域はDCI-P3程度に出される事がある

- 平均で2.5倍くらい、規格よりも明るい
- つまり sRGB 1.0 は 100 nit ではない。250 nit 。
- NaughtDog Filmicは、2.5倍するとリニアになる。

SDRを暗くする？ HDRを明るくする？

- GTSPORTでは、SDRを暗くする方向でバランスを取った。

- HDRを明るくすると、ダイナミックレンジが下がる。
- なぜなら、黒が浮いて、白は頭打ちしてしまう。
- また、SDRはすでに十分明るい。

- 結果、HDRとSDRのバランスが良く取れた。

カラーグレーディング

- GTSPORTでは式による色調補正と、LUTを利用している
- LUTはRec.2020 PQ空間上でオーサリングしている
- SDR画像は Rec.2020 PQにマップしなおしてからLUTを通している
- 色調補正はトーンマップと同様に
  中点を決めてその上下で別に補正を行っている

- 文字で説明しにくいので、直接来てください…

ポストエフェクト

- ほとんどのポストエフェクトはHDR/SDR互換がもともと取れている

- グレアはHDR/SDRの時に別パラメータになる
  - 輝度が出せなくて失われるエネルギーをグレアで補う形
  - 実はレンズの設定などにも応じて変化する

ムービー

- SDR / HDRどちらも、一度 Rec.2020リニアに変換している。
- GT Tonemapで送出テレビに合わせる。
  - オープニング/エンディングともにHDR収録

検証方法

- いろんなテレビといろんな設定で、同じ絵を出して比較
- これがとにかく大変だった
- 東京と福岡

反省点

- 逆トーンマップしやすく作っておくべきだった
  - 当時は意識が回らなかった
  - LUTにして使っている

広色域, 高ダイナミックレンジ

素材の用意

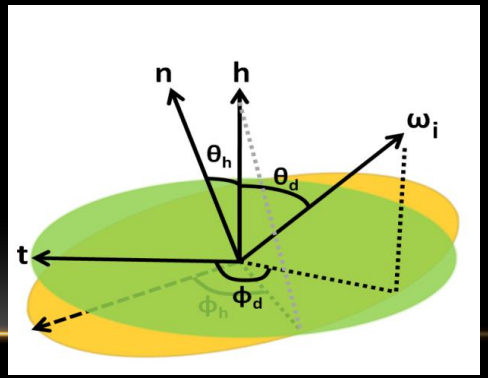
車両マテリアル・測色復元

- フルスペクトル測色機の測定結果をもとにBRDFフィッティング
- 各ステップは以下の通り
  1. 各サンプルをCIE1931XYZ色空間でXYZ値に戻す
  2. 各サンプルのXYZ値とフィッティングBRDFの色差を計算する
  3. 十分に合計色差が小さくなるまでパラメータを最適化する

- 色差はCIE ⊿E00
- ライティングはBT.2020空間、D65

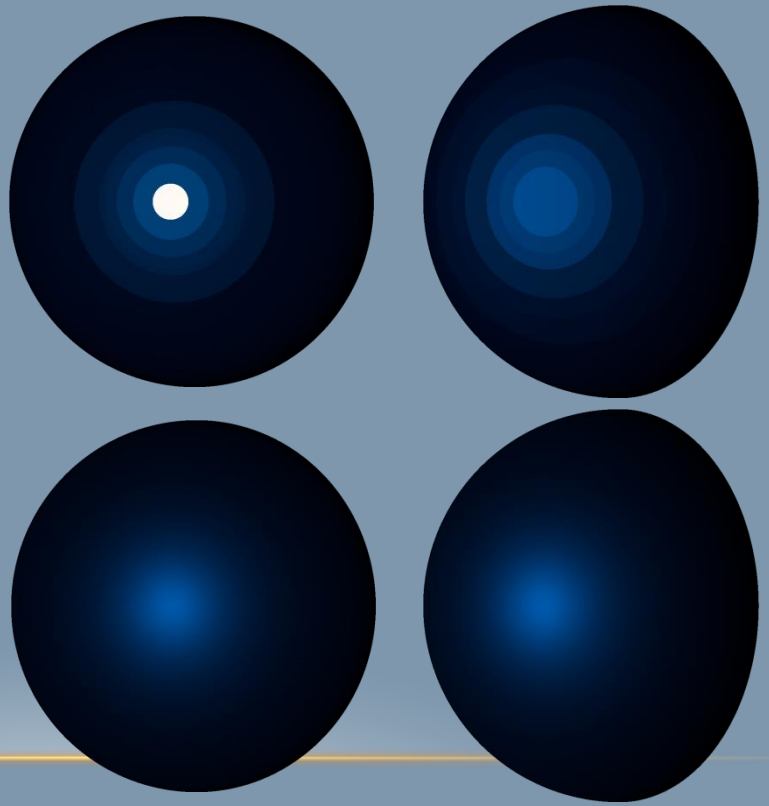
SAMPLE

- 図は測色結果のθd θhプロット
- θd θhプロットは
  ”Toward Efficient Acquisition of BRDFs with Fewer Samples”等を参考に.



SAMPLE RESULT

- 上段は測色結果
- 下段はBRDFレンダリング結果
- 中央は正反射なので無視

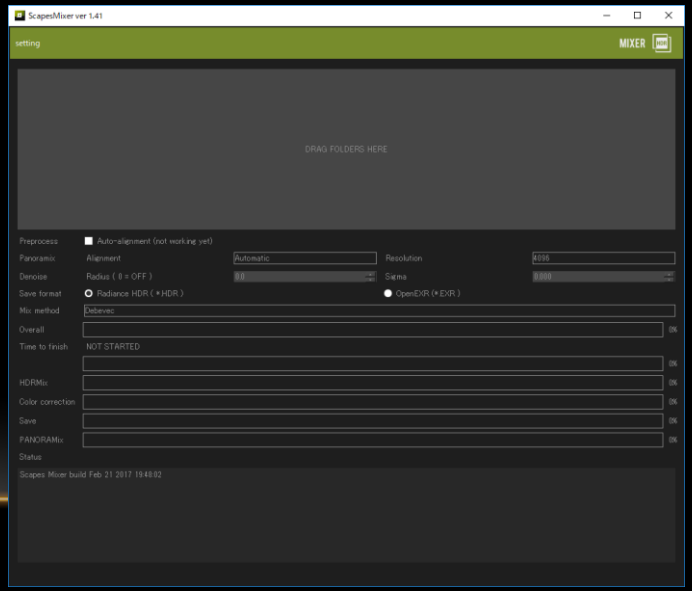


それ以外のアセット. Scapesの場合

- “BG” : 8k級、超高解像度HDR写真
  - 3EV 7枚 ~ 2EV 12枚くらいのブラケット撮影
  - デジタル一眼、RAW撮影
- “PN” : 4k級、高解像度HDRパノラマ
  - 同様にブラケットRAWで撮影
- 自前のHDR合成エンジンで画像を処理

自前HDR合成

- ベースはPaul DebevecのHDR合成
- カメラセンサーキャリブレーションはMitsunaga99
- 大量に処理することに特化
- パノラマのステッチングも同時に行う



ブラケット撮影からのHDR合成

- 各露出iにおける画素xの値 $P_i(x)$ から, 本来の輝度 $I(x)$(cd / sr m^2)を求める
- Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs[Debevec'97]

$$I_x = \sum_{i=1} \frac{P_i(x) W(P_i(x))}{W(P_i(x))}$$

$$W(z) = \begin{cases} z - Z_{min} & if\ z \leq \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max}) \\ Z_{max} - z & if\ z > \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max}) \end{cases}$$

ノイズ対策

- ナイーヴなDebevec合成は、実は品質が低い。
- 非常に暗い画像がノイズまみれになる。
- 重み関数に工夫をするとこれを解決できる。
- 例えば、重み関数の幅を狭める。

色の測定

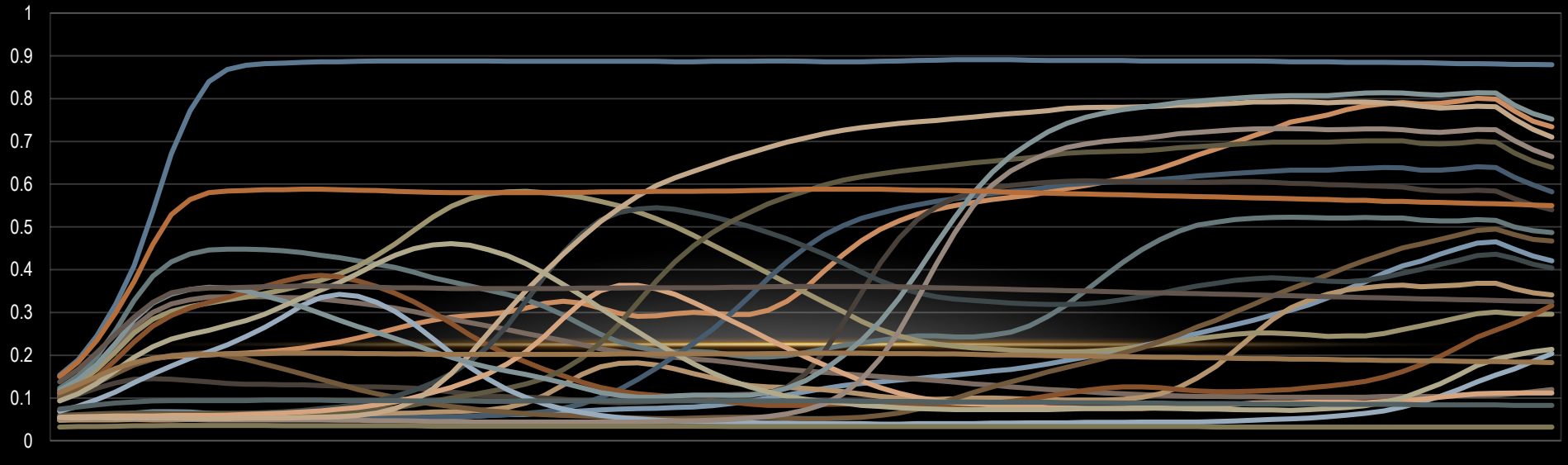
- カメラのRAWはそれぞれ独自の色空間を持っている
- 機種ごと・センサーごとに測定して補正する必要がある

SEKONIC
SPECTROMASTER
C-700
CCT
duv
lux
6873K
0.0025
11300lx

xrite
xrite
COLORCHECKER

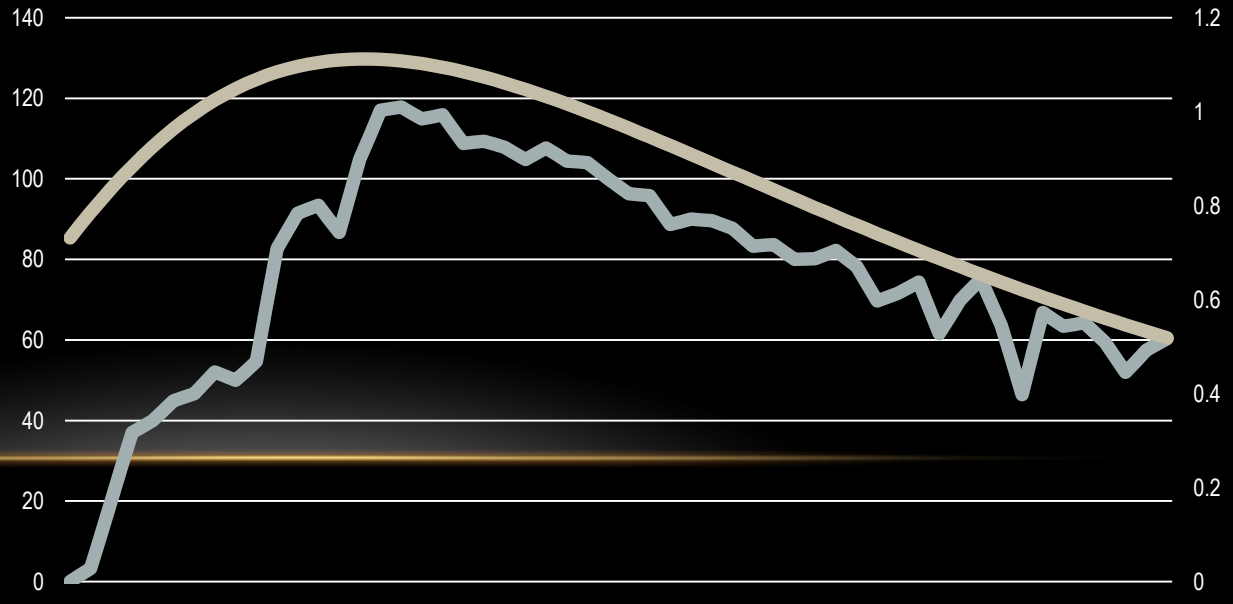
カラーチャート

- 各パッチの分光反射率は既知



高演色光源

- Ra97のLEDが市販されているのでそれを用いた
- 昼間に測定できるときは太陽光でも測定



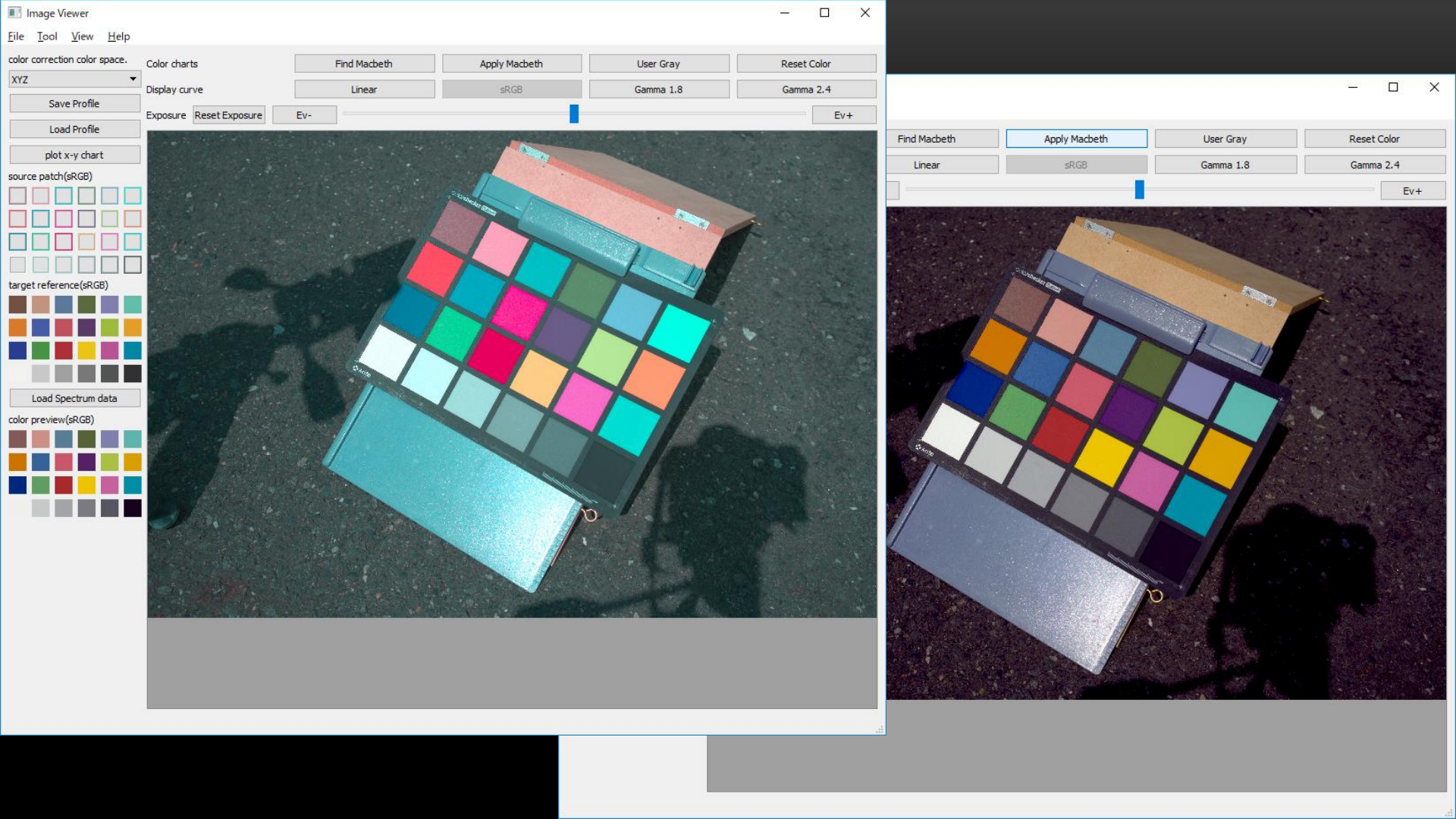
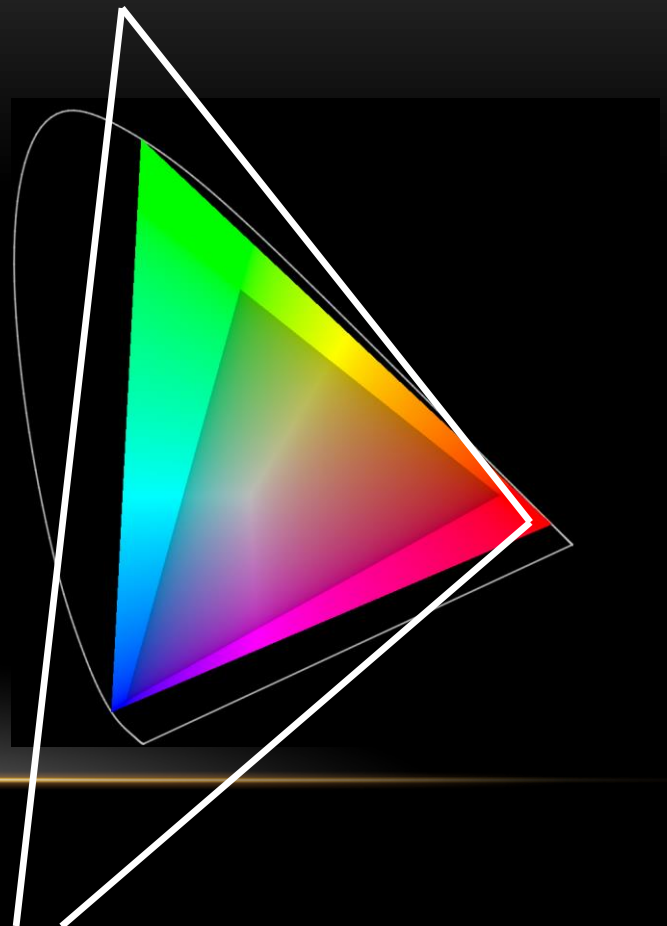


Image Viewer
File
Tool
View
Help
color correction color space.
XYZ
Save Profile
Load Profile
plot x-y chart
source patch(sRGB)
target reference(sRGB)
Load Spectrum data
color preview(sRGB)
Color charts
Find Macbeth
Apply Macbeth
User Gray
Reset Color
Display curve
Linear
sRGB
Gamma 1.8
Gamma 2.4
Exposure
Reset Exposure
Ev-
Ev+
Find Macbeth
Apply Macbeth
User Gray
Reset Color
Linear
sRGB
Gamma 1.8
Gamma 2.4
Ev+

測定例

- 一眼レフ
- RAW画像の色域

- めちゃめちゃ広い
- JPEGはもったいない



データの圧縮・格納

- HDR画像は Radiance HDR形式でストアしている。
  - 色空間情報などのメタデータファイルをペアリング
  - “hdrmix”ファイルと呼んでいる.
  - 画像ビューワ、編集ツールなどはこのファイルを参照する

- Photoshopは.HDRファイルの保存時にピクセル値が壊れる。
- これは仕様であって、修正の予定はないらしい
- Photoshopからの書き出しは必ずOpenEXRを経由する。正直めんどくさい

実機側

- ScapesのHDRファイル格納にはJPEG XRを用いた。
- 色空間はscRGBではなくRec.2020のまま。
- ピクセルフォーマットは、HalfとRGBEを使った。
- エンコードとデコードの速度を改善するために
  改良して独自フォーマットになっている。

- 6000x4000のデコードに3秒前後
- 6000x4000のHDR画像で7MB前後

コース、メニュー等

- コースのアセットは、過去の資産等もありRec.709からの変換も多い
- テクスチャのバンディングは当初の予想よりも気にならなかった
- 天球はRec.2020で作られている
- ライティングもRec.2020
- クルマもRec.2020
- 実際にはかなりリッチな色が出ている
- メニューアセットはデザイナー都合がありRec.709からの変換
- 一部、Rec.2020で色を指定されているパーツがある

今後の展開と、まとめ

将来こうしたい

- アーティストの編集環境の広色域・HDR化
  - テーブル上に乗るようなサイズのHDRモニタがまだ少ない
  - テレビは大きすぎるし、色が信頼できない

- アセットの色彩をもっと計測ベースにしていきたい
- 機械でできる部分はもっと機械に任せて省力化していきたい
- SDR画像からのHDR画像生成なども検討中。
- いろいろやりたい。誰か手伝って…

まとめ

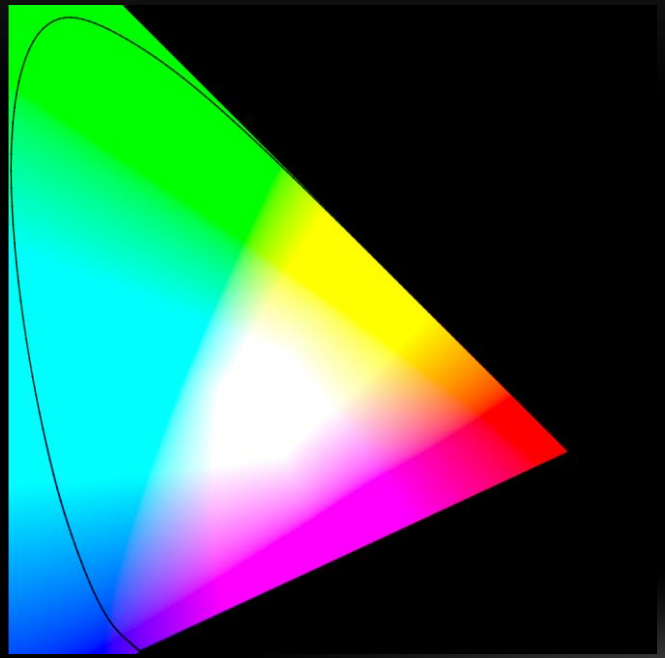
- GTSPORTでHDR対応するためにしてきたことを紹介しました。
- ちゃんと作ったHDR映像は、とても魅力的です。
- 今はまだHDRテレビがそんなに絵を改造してこないので、
  みんなできちんといい絵を出そう！
- 絵を変えないように圧力をかけよう。

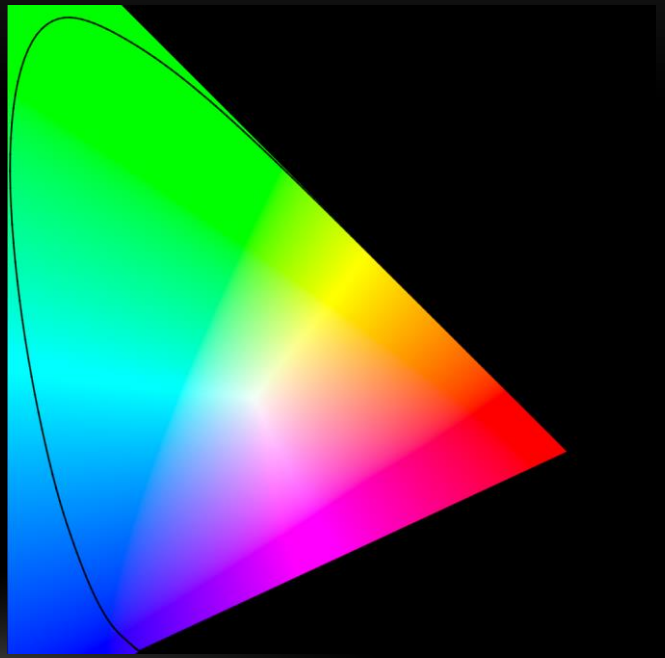
- 計測ベースのマテリアルがあるゲームにはHDR本当におすすめです。
- HDRファーストにすると、SDRの絵も魅力的になりますよ。

質問はありますか？

- nikutama@gmail.com / @nikq
- All material rights reserved.
2017 / Polyphony Digital inc.

APPENDIX: ACES ODT SAMPLE





ACESとの比較

- ACES ODTはパラメトリックではない
  - 何種類かのテレビに合わせてカーブを選択する形
  - それでもいいのかもしれないけど…

- ACES RRTに含まれるマジックナンバーが不安だった
  - クルマなので、色再現に厳しい
  - マジックナンバーの根拠が不明だった

大失敗したパターン

- トーンマップの前に色変換をすると、ヤバい絵が出る

Yxyトーンマップ(高輝度に色を残す)

RGB vs Yxy

RGB tonemap

Yxy tonemap

AMG
AMG

ROADSTER
ROADSTER

ROADSTER

SKYACTIV TECHNOLOGY

ROADSTER